

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO
NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**MONITORAÇÃO DE TRABALHADORES EXPOSTOS À
RADIAÇÃO NATURAL EM MINAS NO SERIDÓ DO
NORDESTE BRASILEIRO**

ISABEL CRISTINA GUERRA SPACOV

**Orientador: Prof. Dr. Romilton dos Santos
Amaral (DEN-UFPE).**

**Co-orientador: Prof. Dr. José Araújo dos
Santos Júnior (DEN-UFPE).**

**Recife, PE
dezembro, 2016**

ISABEL CRISTINA GUERRA SPACOV

**MONITORAÇÃO DE TRABALHADORES EXPOSTOS À
RADIAÇÃO NATURAL EM MINAS NO SERIDÓ DO
NORDESTE BRASILEIRO**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

Orientador: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral (DEN-UFPE).

Co-orientador: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior (DEN-UFPE).

Recife, PE

dezembro, 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S732m Spacov, Isabel Cristina Guerra.
Monitoração de trabalhadores expostos à radiação natural em minas no Seridó do nordeste brasileiro / Isabel Cristina Guerra Spacov. - 2016.
79 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral.

Coorientador: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2016.

Inclui Referências e Apêndice.

1. Energia Nuclear. 2. Radioecologia. 3. NaI(Tl) e BGO. 4. Radiação Gama. 5. Radionuclídeos naturais. 6. Urânio. I. Amaral, Romilton dos Santos. (Orientador). II. Santos Júnior, José Araújo dos. (Orientador). III. Título.

UFPE

612.01448 CDD (22. ed.)

BCTG/2016-329

Monitoração de Trabalhadores Expostos à Radiação Natural em Minas no Seridó do Nordeste Brasileiro

Isabel Cristina Guerra Spacov

APROVADA EM: 09.12.2016

ORIENTADOR: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral –
DEN/UFPE

Prof. Dr. José Ubiratan Delgado –
CNEN/IRD

Prof. Dr. Carlos Costa Dantas – DEN/UFPE

Profa. Patrícia Brandão da Silveira – CRCN-
NE/CNEN

Profa. Dra. Vivianne Lúcia Bormann de Souza – CRCN-
NE/CNEN

Visto e permitida a impressão

Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE

Aos meus filhos Victoria e Mikael, fontes
de todo desejo de lutar, persistir e continuar cada
dia caminhando.

“Confiai sempre no Senhor; porque o Senhor Deus é uma rocha eterna.”

(Isaías 26.4)

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai de infinito amor, por ter me conferido vida e acesso à Sua Palavra, através qual pude obter discernimento e força para esta caminhada.

Aos meus avós (*in Memoriam*), que me trazem à memória minhas origens e assim, fundamentam os alicerces de minha vida.

Aos meus pais Carlos Spacov e Vânia Guerra Spacov (*in Memoriam*), pelo amor, cuidado e ensinamentos que formaram os princípios nos quais, norteio minha trajetória neste mundo.

Ao pai de meus filhos Tedy Ander, pelo apoio e compreensão, para que eu pudesse concluir esta caminhada.

Ao Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral, meu orientador, pelas palavras de incentivo e suporte constante na execução desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior, meu co-orientador, pela abertura das portas do grupo RAE para que assim, esta pesquisa fosse desenvolvida.

Aos professores que fizeram parte das minhas bancas de Seminário I e de Qualificação, por suas sugestões, tendo em vista o aprimoramento da pesquisa e incentivo na caminhada científica, Prof. Dr. João Antônio Filho (UNICAP), Prof. Dr. Rômulo Simões Cézar Menezes (DEN – UFPE) e Prof. Dr. Edílson Accioly Rocha (IFPE).

Ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa.

Aos professores do DEN-UFPE, pela excelência na minha formação acadêmica.

Aos meus colegas de grupo de pesquisa (RAE), em especial a Nilson Medeiros, Otávio Júnior, Luis Rodrigo, Eduardo Eudes, Michelli Cardinalli, Juana Maria, Kennedy Francys, Bruno Albuquerque, José Maciel, Josineide Santos, Jairo Dias, Alberto da Silva, Zahily Fernández, Lino Balcartes, Sr. Edmilson, entre outros, por compartilharmos vários momentos ao longo desta caminhada: apoio, abraços, choros e risos.

Ao Dr. Hermanilton Azevedo Gomes, Israelita Januário, Igor Spacov, Kathy Short, Flávia Gomes Barbosa Maciel, Fernanda Gomes Barbosa, Lucília Maria de Mello Osório e demais amigos não citados aqui diretamente, mas que sabem que fizeram parte desta caminhada, deixo aqui minha gratidão.

Aos colegas do doutorado pelas horas dedicadas ao apoio mútuo e por trilharmos juntos este caminho.

Aos funcionários do DEN-UFPE e do LPR-UFPE pelo suporte.

MONITORAÇÃO DE TRABALHADORES EXPOSTOS À RADIAÇÃO NATURAL EM MINAS NO SERIDÓ DO NORDESTE BRASILEIRO

Autor: Isabel Cristina Guerra Spacov

Orientador: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral

Coorientador: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior

RESUMO

A Província Pegmatítica da Borborema no Nordeste é uma das mais importantes áreas geoeconômicas do Brasil. A atividade de mineração, entretanto, pode elevar a exposição de trabalhadores do setor, às radiações ionizantes. A exposição às radiações no setor mineral depende de uma série de fatores, incluindo o tipo de mina e geologia local, com elevadas concentrações de radionuclídeos que compoem as séries do ^{238}U e do ^{232}Th . Este trabalho teve como objetivo realizar a dosimetria radiométrica ambiental externa, estimando a taxa de dose efetiva em doze minas de extração de caulim, granito, feldspato e scheelita, localizadas nos municípios de Junco do Seridó-PB, Salgadinho-PB, Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB, Equador-RN e Santana do Seridó-RN. O monitoramento foi executado utilizando um espectrômetro gama portátil NaI(Tl) e BGO, com medições realizadas no ar e os resultados obtidos foram comparados a dose efetiva média mundial da exposição à fontes naturais de radiação, de 2,40 mSv/a, baseada no relatório da UNSCEAR. O valor obtido da média aritmética das taxas de doses efetivas foi de 3,34 mSv/a e desvio padrão de 2,47 mSv/a para as minas em conjunto, estando acima do valor de referência mundial, bem como as taxas de doses efetivas das minas de granito (5,80 mSv/a), feldspato (3,28 mSv/a) e scheelita (2,80 mSv/a). Com base nesse estudo, foi evidenciada uma maior radioatividade ambiental na mina de granito (E), em Santa Luzia-PB (11,60 mSv/a), estando superior, cerca de cinco vezes, ao valor de referência mundial. É, portanto, considerada uma área de elevado background natural, com taxa de dose variando de 5 a 20 mSv/a, assim como a zona rural de São José de Espinharas-PB, onde se encontra a jazida de urânio com média de 10,83 mSv/a, ambos na região do Seridó. Por sua vez, apesar do valor médio da taxa de dose efetiva das minas de caulim (1,78 mSv/a) estarem abaixo do valor de referência mundial, a caracterização radiométrica da mina de caulim (D) em Salgadinho-PB, se faz necessária, tendo em vista o valor de 2,94 mSv/a. Desta forma, recomenda-se também, estudos epidemiológicos de caso-controle, coorte e correlação geográfica, que tratem de padrões, causas e quantificação dos valores obtidos na dosimetria ambiental deste estudo, bem como da relação da incidência e prevalência das doenças causadas pela exposição em áreas de elevado background natural.

Palavras-chave: Radioecologia. NaI(Tl) e BGO. Radiação gama. Radionuclídeos naturais. Urânio.

MONITORING OF WORKERS EXPOSED TO NATURAL RADIATION IN MINES LOCATED IN SERIDÓ BRAZILIAN NORTHEAST

Author: Isabel Cristina Guerra Spacov

Advisor: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral

Coorientador: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior

ABSTRACT

The Pegmatitic Borborema Province located in the Northeast of Brazil, is one of the most important geo-economic areas in the country. The mining activity, however, can increase the exposure of workers to ionizing radiation. Exposure to radiation in the mineral industry depends on a number of factors, including the type of mine and local geology, with high concentrations of radionuclides which compose the series of ^{238}U and ^{232}Th . This study aimed to carry out the external environmental radiometric dosimetry, estimating the effective dose rate in twelve mines of kaolin, granite, feldspar and scheelite extraction, located in Junco do Seridó-PB, Salgadinho-PB, Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB, Equador-RN and Santana do Seridó-RN. The monitoring was performed using a spectrometer portable gamma NaI(Tl) and BGO, with measurements in the air and the results were compared to the global average effective dose of exposure to natural sources of radiation of 2.40 mSv/y, based on the UNSCEAR report. The obtained value of the arithmetic mean of the effective dose rate was 3.34 mSv/y from the twelve mines, being above the global reference value, as well as the rates of effective doses of granite mine (5.80 mSv/y), feldspar (3.28 mSv/y) and scheelite (2.80 mSv/y). Based on this study, greater environmental radioactivity in granite mine (E) was observed in Santa Luzia-PB (11.60 mSv/y), being higher, about five times to the global reference value. It is therefore considered an area of high natural background with dose rate ranging from 5 to 20 mSv/y, as well as the São José de Espinharas-PB, where the uranium deposit is located, with an average of 10.83 mSv/y, both in the Seridó region. Meanwhile, although the average value of the effective dose rate of kaolin mine (1.78 mSv/y) is below the world reference value, the radiometric characteristics of the kaolin mine (D) Salgadinho-PB are necessary, in view of the value of 2.94 mSv/y. Thus, also recommended are studies, epidemiological case-control, cohort and geographical correlation, to address patterns, causes and quantization of values obtained in the environmental dosimetry of this study, as well as the relationship of the incidence and prevalence of diseases caused by exposure in areas of high natural background.

Keywords: Radioecology. NaI(Tl) and BGO. Gamma radiation. Natural radionuclides. Uranium.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
Figura 1 – Distribuição da radiação ambiental	15
Figura 2 – Distribuição das fontes de radiação natural	16
Figura 3 – Taxas de doses efetivas em áreas de elevado BG natural	20
Figura 4 – Vias de transferência dos radionuclídeos terrestres e descendentes no Ecossistema	23
Figura 5 – Digrama de blocos de um espectrômetro de raios gama	34
Figura 6 – Localização dos municípios investigados da região do Seridó nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte	36
Figura 7 – Mapa geológico de Junco do Seridó-PB	37
Figura 8 – Mapa geológico de Salgadinho-PB	39
Figura 9 – Mapa geológico de Santa Luzia-PB	40
Figura 10 – Mapa geológico de São José do Sabugi-PB	42
Figura 11 – Mapa geológico de Equador-RN	43
Figura 12 – Mapa geológico de Santana do Seridó-RN	44
Figura 13 – Contribuição de amostragem das doze minas investigadas em Equador-RN, Junco do Seridó-PB, Salgadinho-PB, Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB e Santana do Seridó-RN	45
Figura 14 – Espectrômetro gama da GF Instruments®	46
Figura 15 – Representação das condições de calibração segundo a geometria e ponto de referência	47
Figura 16 – Gráfico de resposta do espectrômetro gama portátil	48
Figura 17 – Diagramas de box plot para diferentes materiais explorados nos campos de mineração	54
Figura 18–Diagrama de box plot da taxa de dose efetiva observada em diferentes campos de mineração de caulim, granito, feldspato e scheelita, na região do Seridó.....	55
Figura 19 – Histogramas de 1.000 (a) e 10.000 (b) reamostragens das taxas de doses efetivas das minas de caulim	59
Figura 20 – Histogramas de 1.000 (a) e 10.000 (b) reamostragens das taxas de doses efetivas das minas de granito	59

Figura 21 – Histogramas de 1.000 (a) e 10.000 (b) reamostragens de taxas de doses efetivas das minas de feldspato	60
Figura 22 – Histogramas de 1.000 (a) e 10.000 (b) reamostragens de taxas de doses efetivas das minas de scheelita	60
Figura 23 – Distribuição espacial das taxas de doses efetivas dos campos de mineração, nos municípios de Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB, Salgadinho-PB, Junco do Seridó-PB, Equador-RN e Santana do Seridó-RN	61
Figura 24 – Curvas de isodoses dos municípios de Equador-RN, Junco do Seridó-PB, Salgadinho-PB, Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB, Santana do Seridó-RN	62
Figura 25 – Abertura para lavra do caulim subterrâneo no município de Equador-RN ...	67
Figura 26 – Dispersão aleatória dos rejeitos de caulim	68

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Séries radioativas naturais (Série do Urânio)	18
Tabela 2 – Séries radioativas naturais (Série do Tório)	19
Tabela 3 – Características da fonte de ^{137}Cs utilizada na calibração	47
Tabela 4 – Pontos monitorados, minas/material explotado, municípios e coordenadas dos campos de mineração investigados no Seridó	49
Tabela 5 – Taxas de doses efetivas dos campos de mineração de caulim, granito, feldspato e scheelita, localizados no Equador-RN, Junco do Seridó-PB, Salgadinho-PB, Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB e Santana do Seridó-RN	51
Tabela 6 – Estatística descritiva das taxas de doses efetivas, medidas nos campos de mineração estudados	52
Tabela 7 – Estatística descritiva das taxas de doses efetivas, medidas nos campos de mineração estudados, por tipo de material explotado	53
Tabela 8 – Teste de Shapiro-Wilk para todas as minas estudadas em conjunto e para os materiais explotados nas minas	57
Tabela 9 – Teste de Shapiro-Wilk para cada mina estudada	58
Tabela 10 – Comparação dos valores médios das taxas de doses efetivas ambientais do BG natural deste estudo, com outros da literatura	63
Tabela 11 – Taxas de doses efetivas para diferentes fatores de ocupação (FO) <i>outdoor</i> ...	65

LISTA DE EQUAÇÕES

	Página
Equação 1 - Exposição (X).....	30
Equação 2 - Dose Absorvida (D).	31
Equação 3 - Dose Equivalente (H).....	31
Equação 4 - Dose Efetiva (E).....	31
Equação 5 - Taxa de Dose Efetiva (\dot{H}_E).....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

${}^7\text{Be}$	Berílio-7
Bq	becquerel
${}^{14}\text{C}$	Carbono-14
${}^3\text{H}$	Hidrogênio-3
${}^{40}\text{K}$	Potássio-40
Kg	Kilograma
MeV	Megaelétron volts
mSv	Milisievert
${}^{22}\text{Na}$	Sódio-22
ppm	Partes por milhão
${}^{226}\text{Ra}$	Rádio-226
${}^{87}\text{Rb}$	Rubídio-87
${}^{222}\text{Rn}$	Radônio-222
${}^{220}\text{Rn}$	Radônio-220
${}^{219}\text{Rn}$	Radônio-219
S.I.	Sistema Internacional
${}^{232}\text{Th}$	Tório-232
${}^{238}\text{U}$	Urânio-238
UO_2	Dióxido de urânio
UO_3	Trióxido de urânio
U_3O_8	Octaóxido de triurânio

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Radioatividade ambiental	15
2.1.1 Radioatividade natural	16
2.1.2 Radionuclídeos terrestres	17
2.1.2.1 Urânio	21
2.1.2.2 Radônio	21
2.1.2.3 Tório	22
2.1.2.4 Potássio	22
2.1.3 Exposição a radionuclídeos terrestres	22
2.2 Pesquisa de urânio no Brasil	26
2.3 Mineração e minérios investigados	27
2.3.1 Caulim	29
2.3.2 Granito	29
2.3.3 Feldspato	29
2.3.4 Scheelita	30
2.4 Unidades e Grandezas dosimétricas	30
2.4.1 Exposição (X)	30
2.4.2 Dose Absorvida (D)	30
2.4.3 Dose Equivalente (H)	31
2.4.4 Dose Efetiva (E)	31
2.5 Detetores de radiação	32
2.5.1 Detetor cintilador NaI(Tl) e BGO	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Área de Estudo	35
3.1.1 Caracterização dos municípios	36
3.2 Sistema de Medições.....	45
3.2.1 Calibração do detetor cintilador NaI(Tl) e BGO	46
3.2.2 Monitoração ambiental	48
3.3 Tratamento Estatístico dos dados	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	70
APÊNDICE A – Recomendações	77

1. INTRODUÇÃO

A exposição à radioatividade ambiental natural representa 70,33% de toda dose de radiação recebida pela população mundial, por outro lado, a soma de todas as fontes artificiais corresponde a apenas 29,67%. A radiação natural terrestre, por sua vez, abrange 84,10% da radiação ambiental, sendo relacionada ao radônio e seus descendentes, aos outros radionuclídeos da série do ^{238}U , a série do ^{232}Th , ^{87}Rb e ^{40}K . Já o menor percentual da radiação natural, é de origem cósmica (UNSCEAR, 2000; 2008). Os radionuclídeos naturais terrestres estão distribuídos em todo o planeta e são encontrados nos solos, nas rochas, em águas e nos alimentos (BALOCH *et al.*, 2012). Desta forma, infere-se que os seres vivos estão continuamente expostos às radiações (SANTOS JÚNIOR, 2005).

A radiação gama emitida pelos radionuclídeos naturais proveniente do decaimento das séries radioativas naturais do urânio (^{238}U) e do tório (^{232}Th) alcança os seres humanos nos mais variados locais, desde suas residências, até em áreas de trabalho, como nos campos de minérios (WAKEFORD, 2009; BALOCH *et al.*, 2012). As rochas ígneas por sua vez, estão associadas aos maiores níveis de radiação, destacando-se o granito (ROCHA, 2012). A gravidade do risco radiológico é estimado com base na dose anual de radiação recebida por um indivíduo ao trabalhar ou viver no ambiente de exposição radioativa acima do normal (ALI *et al.*, 2011).

Muitas mineradoras que não exploram urânio ou tório diretamente, também podem gerar exposições importantes aos trabalhadores dos campos de mineração, bem como a população que vive em áreas adjacentes às minas. No entanto, vale ressaltar que, no processo associado à extração e ao processamento de rochas e minérios que contenham urânio e/ou tório associados ao bem mineral principal, normalmente o risco à saúde decorrente da radiação é considerado pequeno. Por este motivo, não se costuma realizar o monitoramento radiológico nessas minas, tampouco uma avaliação de seu impacto ambiental, uma vez que não existe uma percepção clara do risco radiológico, nem regulamentação que exija tal acompanhamento sistemático. Como consequência desta situação, os dados para avaliação da exposição tanto dos trabalhadores das minas, quanto da população circunvizinha, são baseados em informações incompletas e estudos isolados, embora a sua avaliação seja de extrema relevância.

Contudo, a Província Pegmatítica Borborema-Seridó (RN-PB), conhecida como região do Seridó, localizada no nordeste brasileiro é composta por formações pré-cambrianas (VERMA; OLIVEIRA, 2015). É uma região com ocorrências e jazimentos de rochas ornamentais, bem como de minerais metálicos, gemas e industriais, que também engloba um conjunto de atividades de produção mineral com várias ocorrências cadastradas, entre elas, uma jazida em São José de Espinharas-PB, identificada como anômala em urânio pela NUCLEBRÁS (Empresas Nucleares Brasileiras S/A), que atuou entre 1977 a 1982 em todo território nacional. Esta jazida possui 12 toneladas de reserva (U_3O_8), com um teor médio de 1.200 mg.kg^{-1} (ppm) de urânio (BENTES *et al.*, 1977; SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2006; OLIVEIRA, 2011). Os trabalhadores dos campos de minérios deste estudo podem estar expostos a níveis diferenciados de radiação ambiental, oriundos do *background* (BG) natural, correlacionados ou não, à jazida aludida.

Estudos relacionados à radiação oriunda do BG natural assumem grande importância, uma vez que representa o maior percentual de fonte de radiação natural (VIRUTHAGIRI *et al.*, 2013). Os níveis de radiação natural são avaliados e apresentados pelo UNSCEAR - Comitê Científico Sobre os Efeitos da Radiação Atômica (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations). De acordo com o relatório emitido por este Comitê (2008), a média de taxa de dose efetiva mundial total é de 2,40 mSv anuais, os quais relacionam-se à exposição natural.

Segundo o UNSCEAR (2010), locais que apresentam níveis elevados de radiação natural também estão associados a exposição à radiação gama. Como a região do Seridó abarca uma jazida de urânio, este estudo teve como objetivo realizar a monitoração radiométrica das minas de caulim, granito, feldspato e scheelita, através da estimativa de dose efetiva, a fim de avaliar os riscos aos quais os trabalhadores dessas minas estão expostos. Para tal fim, foi utilizado o detetor gama do tipo discriminador NaI(Tl) e BGO (germanato de bismuto), pertencente ao Grupo de Estudos em Radioecologia (RAE), vinculado ao Departamento de Energia Nuclear (DEN/UFPE).

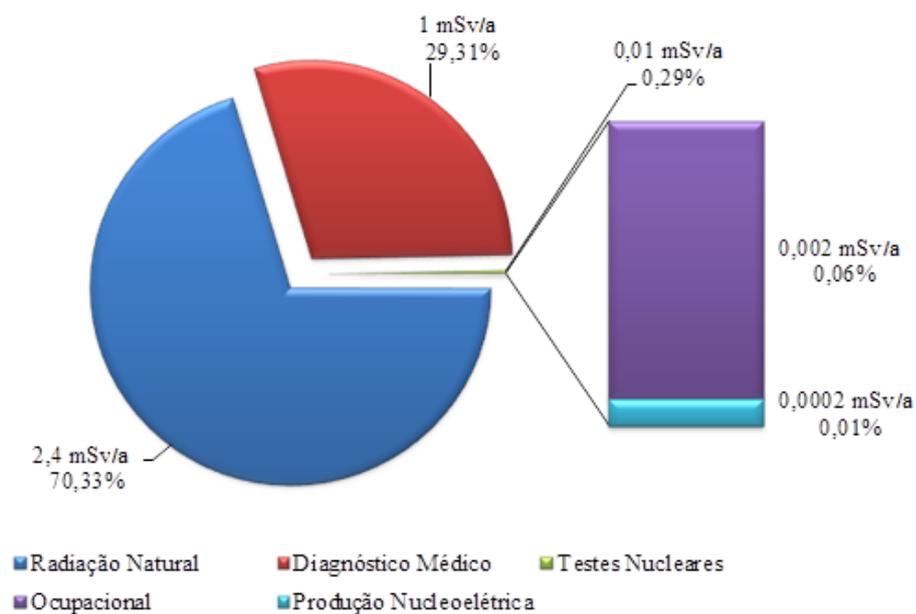
2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, será descrita a radioatividade ambiental, destacando-se a do tipo natural e sua relação com os radionuclídeos primordiais. Posteriormente, será feita uma correlação com o setor de mineração, mais especificamente a contextualização do mesmo com os NORMs e TENORMs, seguido de uma menção das grandezas radiológicas e do sistema de medições utilizado, o qual será mais detalhado no tópico material e métodos.

2.1 Radioatividade ambiental

A radioatividade ambiental abrange as fontes naturais de radiação e aquelas fontes artificiais. Em geociências, ambas as fontes são estudadas por meio de sua capacidade de causar ionização na matéria (IAEA, 2003). As fontes naturais representam 70,33%, da dose de radiação recebida pela população mundial, enquanto que as artificiais representam o total de 29,67%, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Distribuição da radiação ambiental.



Fonte: adaptado de UNSCEAR (2000).

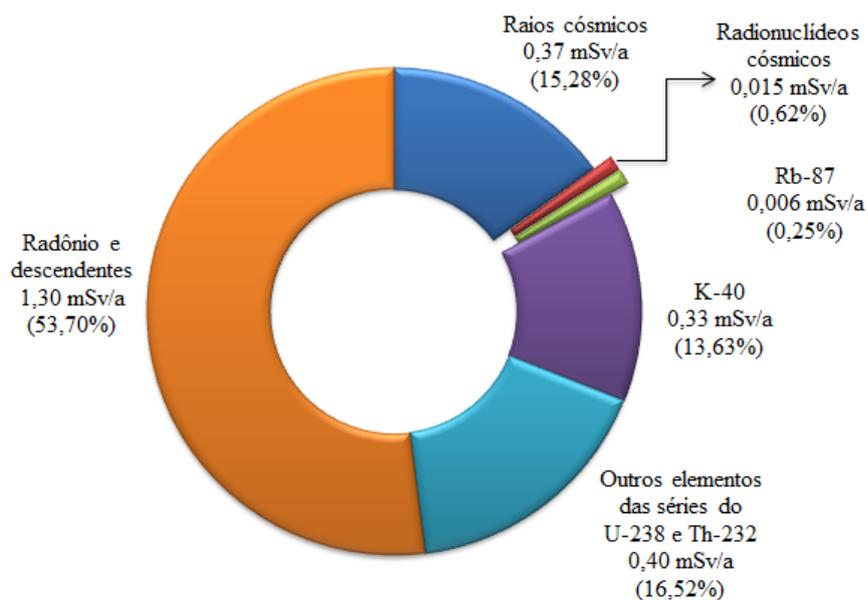
2.1.1 Radioatividade natural

A exposição dos seres humanos à radiação a partir de fontes naturais é um fato permanente com a vida na Terra (SANTOS JÚNIOR, 2005). As fontes naturais de radiação estão presentes em todos os compartimentos do planeta e são distribuídas nos gases atmosféricos, nas águas de rios e oceanos, nos solos, em rochas, nos animais e nos vegetais (UNSCEAR, 2000; MAHER; RAED, 2007). De forma que não há lugar na Terra sem influência da radiação ionizante natural.

Na natureza, há cerca de 340 núclídeos, sendo 70 radioativos. Estes, formados por elementos que apresentam números atômicos superiores a 80, na sua maioria Oliveira (2011 apud EISENBUD; GESELL, 1997). Tendo em vista que a radiação natural representa mais de 2/3 da contribuição de todas as fontes de radiação, o estudo da radiação natural através da dosimetria ambiental, assume grande importância.

As fontes naturais de radiação abrangem a radiação cósmica e a radiação terrestre. Os núclídeos terrestres por sua vez, são considerados como a maior fonte de origem natural de radiação (ABUSINI, 2007; YASIR, *et al.*, 2007), abrangendo 84,10% e correspondem em maior percentual ao radônio e descendentes, aos outros elementos das séries do ^{238}U e ^{232}Th , ^{87}Rb e ^{40}K . A Figura 2 apresenta a distribuição das fontes de radiação natural.

Figura 2 - Distribuição das fontes de radiação natural.



Fonte: adaptado de UNSCEAR (2000).

Por sua vez, a radiação cósmica abrange os raios cósmicos e radionuclídeos cósmicos, também denominados, cosmogênicos. No primeiro caso, a radioatividade é proveniente das estrelas - inclusive do sol - e das galáxias fora do sistema solar, consistindo em componentes nucleônicos (98%) e elétrons (2%). Os componentes nucleônicos são constituídos principalmente de prótons (88%), partículas alfa (11%) e alguns núcleos atômicos mais pesados (1%) (UNSCEAR, 2000; 2008). Já os nuclídeos cosmogênicos, são núcleos radioativos e incluem o ^3H , ^7Be , ^{14}C e ^{22}Na (UNSCEAR, 2000). Estes surgem das interações dos raios cósmicos de alta energia com os núcleos dos átomos que compõem a atmosfera terrestre através de uma reação denominada espalçamento (MÁDUAR, 2000; SANTOS JÚNIOR, 2005). Contudo, os radionuclídeos cosmogênicos contribuem pouco para as doses efetivas anuais de radiação (UNSCEAR, 1993; 2000).

A radiação natural varia de lugar para lugar e depende tanto da intensidade dos raios cósmicos, estes condicionados à altitude e latitude (UNSCEAR, 2000; 2008), quanto dos minerais de origem terrestre (CEMBER; JOHNSON, 2009), que por sua vez, relacionam-se às condições geológicas e geoquímicas das rochas e solos (TZORTZIS *et al.*, 2003).

Os radionuclídeos terrestres, conhecidos como primordiais, estão distribuídos na crosta terrestre desde a sua formação (DAMASCENA, *et al.*, 2015) e podem provocar danos a saúde humana, caso o ambiente apresente taxas de doses efetivas elevadas associadas aos mesmos.

2.1.2 Radionuclídeos terrestres

As contribuições para a dose de radiação gama terrestre correspondem aos radionuclídeos terrestres das séries do ^{238}U e ^{232}Th , além do ^{40}K , tendo em vista que a série do ^{235}U não oferece risco por representar apenas 0,72% do urânio natural (UNSCEAR, 2000). Do ponto de vista dosimétrico, as séries radioativas do ^{238}U e do ^{232}Th , bem como seus descendentes em conjunto, são as que mais contribuem para a taxa de dose efetiva proveniente de fontes naturais, com participação média de 1,33 mSv/a (56% da dose total) e 0,33 mSv/a (14% da dose total), respectivamente (UNSCEAR, 2000; 2008). Estas séries radioativas são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Séries radioativas naturais (Série do Urânio).

Nuclídeo	Meia Vida	Principal energia de radiação (MeV) e intensidades*					
		α		β		γ	
^{238}U	$4,468 \times 10^9$ anos	4,15	23,0%	-	-	-	-
		4,19	77,0%	-	-	-	-
\downarrow ^{234}Th	24,1 dias	-	-	0,103	19%	0,063	3,50%
		-	-	0,191	81%	0,093	4,00%
\downarrow ^{234}Pa	1,18 minutos	-	-	2,290	98%	0,765	0,30%
		-	-	-	-	1,001	0,60%
99,86% \downarrow ^{234}Pa \downarrow 0,14%							
^{234}Pa	6,7 horas	-	-	0,530	66%	0,100	50,00%
		-	-	1,130	13%	0,700	24,00%
		-	-	-	-	0,900	70,00%
\downarrow ^{234}U	$2,48 \times 10^5$ anos	4,72	28,0%	-	-	0,053	0,20%
		4,77	72,0%	-	-	-	-
\downarrow ^{230}Th	$7,52 \times 10^4$ anos	4,62	24,0%	-	-	0,068	0,60%
		4,68	76,0%	-	-	0,142	0,07%
\downarrow ^{226}Ra	1602 anos	4,60	5,5%	-	-	0,186	4,00%
		4,78	94,5%	-	-	-	-
\downarrow ^{222}Rn	3,825 dias	5,49	100,0%	-	-	0,510	0,07%
\downarrow ^{218}Po	3,05 minutos	6,11	100,0%	0,330	100%	-	-
99,98% \downarrow ^{214}Pb \downarrow 0,02%							
^{214}Pb	26,8 minutos	-	-	1,030	6%	0,295	19,00%
		-	-	-	-	0,352	36,00%
\downarrow ^{218}At	2 segundos	6,65	6,0%	0,670	94%	-	-
		6,70	94,0%	-	-	-	-
\downarrow ^{214}Bi	19,7 minutos	5,61	100,0%	3,260	100%	0,609	47,00%
		-	-	-	-	1,120	17,00%
99,96% \downarrow ^{214}Po \downarrow 0,04%							
^{214}Po	164 microsegundos	7,83	100,0%	-	-	0,799	0,014%
\downarrow ^{210}Tl	1,32 minutos	-	-	2,300	100%	0,296	80,00%
		-	-	-	-	0,795	100,00%
		-	-	-	-	1,310	21,00%
\downarrow ^{210}Pb	22 anos	3,70	$1,8 \times 10^{-8}$ %	0,017	85%	0,047	4,00%
		-	-	0,064	15%	-	-
\downarrow ^{210}Bi	5,02 dias	4,93	60,0%	1,155	100%	-	-
		4,89	34,0%	-	-	-	-
		4,59	5,0%	-	-	-	-
$\sim 100\%$ \downarrow ^{210}Po \downarrow $\sim 0,00001\%$							
^{210}Po	138,3 dias	5,30	100,0%	-	-	0,803	0,0011%
\downarrow ^{206}Tl	4,19 minutos	-	-	1,520	100%	-	-
\downarrow ^{206}Pb	Estável	-	-	-	-	-	-

*As intensidades se referem a percentagem de desintegrações do nuclídeo. Radionuclídeos das séries radioativas, tempo de meia-vida e radiações emitidas pelos núcleos até alcançar estabilidade.

Fonte: Adaptado de IAEA (2003)

Tabela 2 - Séries radioativas naturais (Série do Tório).

Nuclídeo	Meia Vida		Principal energia de radiação (MeV) e intensidades*		
			α	β	γ
²³² Th	1,39x10 ¹⁰	anos	3,95 4,01	24,0% 76,0%	- -
↓ ²²⁸ Ra	5,75	anos	-	0,055	100% -
↓ ²²⁸ Ac	6,13	horas	-	2,110	100% 0,340 0,908 0,960
↓ ²²⁸ Th	1,913	anos	5,34 5,42	28,0% 71,0%	- 0,084 0,214
↓ ²²⁴ Ra	3,64	dias	5,45 5,68	5,5% 94,5%	- 0,241
↓ ²²⁰ Rn	55,6	segundos	6,30	100,0%	- 0,550
↓ ²¹⁶ Po	0,145	segundos	6,78	100,0%	- -
↓ ²¹² Pb	10,64	horas	-	0,580	0,239 0,300
↓ ²¹² Bi	60,5	minutos	6,05 6,09	70,0% 30,0%	2,250 100% 0,040 0,727 1,620
64,00% ↓ ²¹² Po	304	nanosegundos	8,78	100,0%	- -
36,00% ↓ ²⁰⁸ Tl	3,1	minutos	-	1,80	100% 0,511 0,583 0,860 2,614
↓ ²⁰⁸ Pb	Estável	-	-	-	-

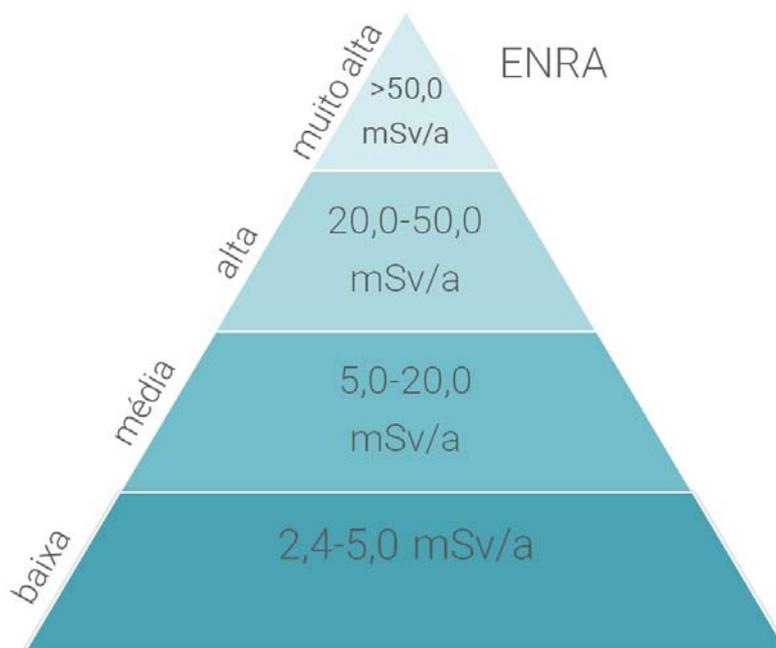
*As intensidades se referem a percentagem de desintegrações do nuclídeo. Radionuclídeos das séries radioativas, tempo de meia-vida e radiações emitidas pelos núcleos até alcançar estabilidade.

Fonte: Adaptado de IAEA (2003)

Uma região de alto *background* ou uma Área de Radiação Natural Elevada - ENRA (Enhanced Natural Radiation Area) é definida como uma área onde a radiação natural no solo, rocha, ar (*outdoor* e *indoor*), água e alimentos, entre outros, levam a uma exposição elevada, quer interna ou externamente (HENDRY, *et al.*, 2009).

A ENRA é dividida por taxas, as quais correspondem a áreas de elevado BG natural, são elas: taxa baixa (2,4-5,0 mSv/a), média (5,0-20,0 mSv/a), alta (20,0-50,0 mSv/a) e muito alta (acima de 50,0 mSv/a) (HENDRY, *et al.*, 2009), Figura 3.

Figura 3 - Taxas de doses efetivas em áreas de elevado BG natural.



Fonte: adaptado de HENDRY, *et al.*, 2009

Sabe-se que algumas rochas acumulam elementos primordiais em níveis anormais, fato este que torna os ambientes que elas ocupam, uma área de alto “background” natural. Como exemplos, têm-se algumas rochas graníticas e aquelas de origem fosfáticas. No Brasil, mais especificamente nos municípios da região sul de Minas Gerais, destacando-se o planalto de Poços de Caldas, é considerado uma área de alto BG natural. Nesta área, há uma preocupação quanto a uma possível associação da exposição à radiação natural como o aumento da incidência de câncer. Já em Guarapari-ES, destacam-se elevados níveis de radiação nas praias de areias monazíticas (ANJOS *et al.*, 2005). Por sua vez, na região nordeste do país, destacam-se níveis elevados de radiação na região fosforita em Paulista-PE (AMARAL, 1987) e em rochas cálcio silicática anfíbolítica em Pedra-PE (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2006). Além dos volumes elevados das reservas de urânio de Caetité-BA (PEREIRA *et al.*, 2004) e Itaitaia-CE (VERÍSSIMO, *et al.*, 2016).

No meio ambiente, a quantidade de urânio tem aumentado devido a algumas atividades humanas, entre elas, sua extração em campos de minérios, para utilização na indústria nuclear, o que facilita a lixiviação de seus principais produtos de decaimento, além da liberação do ^{222}Rn para a atmosfera. A exposição da população ao urânio e seus descendentes pode de se dar por meio da ingestão de água, alimentos ou inalação. Apesar de no mínimo 98% do urânio que passa internamente pelo organismo não ser absorvido, os 2% restantes podem ser encontrados nos rins, ossos e pulmões (USEPA, 2006).

2.1.2.1 Urânio

O urânio (U), por ser um mineral extratético para a produção de energia, traz um valor econômico agregado ao país. Na natureza, é encontrado principalmente na forma de óxidos de coloração amarelada, dos quais se destacam o UO_2 , UO_3 e U_3O_8 . No solo, o urânio é normalmente encontrado entre 2 a 3 mg.kg^{-1} (IAEA, 2003), variando entre 0,5 a 5,0 mg.kg^{-1} em rochas. Seus níveis estão relacionados com os tipos de rochas a partir das quais os solos se originam. Níveis de radiação mais elevados estão geralmente associados a rochas ígneas tais como as graníticas e níveis mais baixos, às sedimentares, uma das exceções são as rochas sedimentares de origem fosfática (SANTOS JÚNIOR, 2009). Estudos epidemiológicos em mineradores de urânio constataram que doses externas de radiação gama foram absorvidas pela medula óssea, podendo alterar as hemácias, os leucócitos e as plaquetas, desencadeando a disfunção no transporte de oxigênio, a diminuição da defesa contra infecções, além de afetar o sistema de coagulação do sangue (MARSH, *et al.*, 2012).

O urânio possui como isótopo mais comum (abundante) o ^{238}U . Por sua vez, devido a sua baixa contribuição isotópica, o ^{235}U não é representativo, correspondendo a 99,27% e 0,72%, respectivamente (PASCHOA; STEINHÄUSLER, 2010). Possuidor de meia-vida semelhante a idade do planeta Terra e levando em consideração que a massa total da Terra é $5,97 \times 10^{24}$ kg, a quantidade de ^{238}U pode ser estimada em $9,55 \times 10^{18}$ kg (FOLKNER; WILLIAMS, 2008). Desta forma, estudo da série do ^{238}U é o mais significativo na dosimetria natural.

2.1.2.2 Radônio

O radônio (Rn) apesar de ser um gás quimicamente inerte, apresenta risco tanto devido a irradiação quanto acumulado no corpo humano, em função do seu decaimento e de seus descendentes. Seus isótopos naturais ^{222}Rn e ^{220}Rn são produzidos respectivamente do decaimento do ^{238}U e ^{232}Th . O ^{222}Rn é o foco da atenção quando se trata de exposição de indivíduos ao radônio, pois, dentre todos os isótopos, é o que apresenta maior meia-vida física (3,8 dias) e vários descendentes emissores alfa (^{218}Po , ^{214}Po , ^{210}Po), e outros emissores beta/gama tais como ^{214}Pb , ^{214}Bi , etc., e, por ser gás nobre, possui a capacidade de se difundir através do solo, rochas e minerais, emanando para o interior dos ambientes. As partículas geradas pela desintegração do radônio tendem a fixar-se às partículas de poeira presentes no ar, que ao serem inaladas e aderidas ao pulmão, aumentam o risco de desenvolvimento de câncer neste órgão, principalmente quando associado a locais com baixa ventilação, em casos

de exposições crônicas (BALOCH *et al.*, 2012). Mas também, está associado ao surgimento de doenças cardíacas e cataratas em indivíduos expostos cronicamente (WAKEFORD, 2009).

Na área rural de Poços de Caldas-MG, onde ocorre à maioria das anomalias geológicas, correspondem os maiores valores de concentração de atividade do radônio e taxa de dose gama externa, de 220 Bq.m^{-3} e $0,20 \text{ mGy.h}^{-1}$, respectivamente (OTERO *et al.*, 2007).

2.1.2.3 Tório

O tório (Th), que compõe a série radioativa natural apresentada na Tabela 2, é um metal com coloração que varia entre o branco prateado e cinza escuro. Na crosta terrestre, encontra-se na faixa de 8 a 12 mg.kg^{-1} (IAEA, 2003) e tem como isótopo primordial o ^{232}Th , encontrado em diversos tipos de rochas, como as ígneas (TUREKIAN, 1970). Considerando a massa total da crosta terrestre, a quantidade de ^{232}Th pode ser estimada em $3,46 \times 10^{19} \text{ kg}$ e contribui com 0,09 mSv da dose efetiva anual da exposição a radionuclídeos naturais juntamente com seus descendentes (UNSCEAR, 2000).

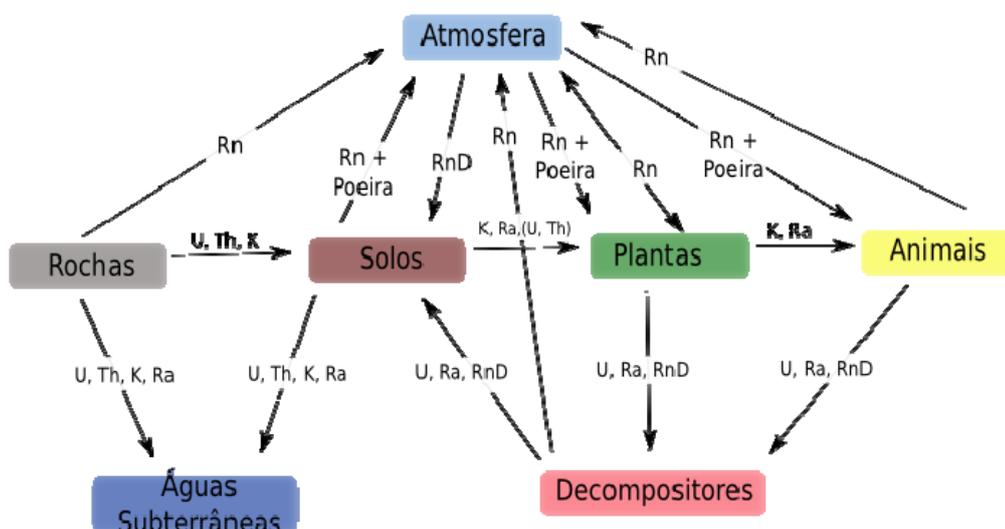
2.1.2.4 Potássio

O potássio (K) é um metal alcalino de coloração branca prateada, encontrado na maioria dos solos, em altos níveis em águas salgadas e também, depositado em alimentos e no corpo humano (BRADY, 1989). Segundo Anjos (2005), é comumente encontrado em rochas que contêm feldspato potássico ou micas. Seus isótopos naturais são ^{39}K , ^{40}K e ^{41}K , mas apenas o isótopo ^{40}K é radioativo, presente no meio ambiente numa concentração média de 0,0117% do potássio total (AFSHARI *et al.*, 2009). O que corresponde a uma contribuição de 13,63% das fontes de radiação natural, sendo portanto, o isótopo mais significativo para dosimetria (Figura 2). Em um ser humano com 70 kg, há cerca de 140 g de potássio total, conseqüentemente, a atividade de ^{40}K correspondente é de 3,7 Bq, o que equivale a dose anual de 0,17 mSv (UNSCEAR, 2000).

2.1.3 Exposição a radionuclídeos terrestres

Tendo em vista que os radionuclídeos naturais terrestres estão presentes no meio ambiente, vale salientar que a maioria deles é continuamente transferida através do ecossistema terrestre (UNSCEAR, 2000; BALOCH, *et al.*, 2012). As principais vias de transferência dos radionuclídeos terrestres e seus descendentes no ecossistema são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 - Vias de transferência dos radionuclídeos terrestres e descendentes no ecossistema.



Fonte: adaptado de MAZZILLI, *et al.* (2011)

De uma maneira geral, as vias de exposição do ser humano à radiação podem ser resumidas em exposição cósmica, terrestre externa (oriunda do solo e rocha) e terrestre interna (devido à inalação de material particulado, gases e à ingestão de líquidos e alimentos, contendo radionuclídeos). Assim, o processo de avaliação ambiental inicia-se seguindo o radionuclídeo de interesse desde a fonte de exposição radioativa, através das várias vias de exposição, até alcançar o ser humano.

A posição regulatória CNEN-NE 6.02 (CNEN, 1998), cita que os radionuclídeos são classificados quanto a sua radiotoxicidade de A até D. Sendo a classe A de muito alta radiotoxicidade e a classe D de baixa radiotoxicidade. Os radionuclídeos de interesse das séries do ^{238}U e ^{232}Th estão classificados como classes A, B (alta radiotoxicidade) e C (relativa radiotoxicidade). Diversas mineradoras não nucleares podem apresentar problemas radiológicos potenciais causados pela presença de radionuclídeos associados ao bem mineral principal. Valores típicos para radionuclídeos em carvão e cinzas mais pesadas, foram reportados pela UNSCEAR (1993), em que se observa um aumento da concentração de atividade de radionuclídeos nas cinzas cinco vezes maiores, em relação ao carvão. Já para as mineradoras de fosfato, é considerada como uma das mais significativas em termos radiológicos, tanto na extração, quanto na fase de deposição dos rejeitos contendo fosfogesso (BURNETT; HULL, 1995).

Assim, grandes áreas contendo rejeitos de beneficiamento de minérios convencionais contendo radionuclídeos associados podem ser abandonadas ao final das operações e, portanto, ações remediadoras para aquelas áreas poderão ser necessárias dependendo dos níveis dos radionuclídeos. Desta forma, a estimativa do rejeito sólido gerado e estocado pela mineradora é de extrema importância na avaliação do impacto radiológico ambiental.

Tendo em vista a posição regulatória CNEN NN 4.01 (2005), que trata dos requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações mineiro-industriais, tem como objetivo:

... estabelecer os requisitos de segurança e proteção radiológica de instalações mineiro-industriais que manipulam, processam, bem como armazenam minérios, matérias-primas, estéreis, resíduos, escórias e rejeitos contendo radionuclídeos das séries naturais do urânio e tório, simultaneamente ou em separado, e que possam, a qualquer momento do seu funcionamento ou da sua fase pós-operacional, causar exposições indevidas de indivíduos do público e de trabalhadores à radiação ionizante.

E identifica que o trabalhador é a “pessoa que, em decorrência do seu trabalho a serviço da instalação, possa receber, por um ano, doses superiores aos limites primários para indivíduos do público, estabelecidos na Norma CNEN-NN-3.01 (retificado pela publicação no D.O.U. em 26.01.2005)”. Por sua vez, a norma da CNEN-NN-3.01 (2005), estabelece que a exposição do público, é uma “exposição de indivíduos do público a fontes e práticas autorizadas ou em situações de intervenção. Não inclui exposição ocupacional, exposição médica e exposição natural local”.

Segundo Strefer (2007) ao tratar das recomendações da ICRP - Comissão Internacional em Proteção Radiológica - 2007, já revisada da ICRP (1990) e CNEN-NN-3.01 (2005), a limitação de dose individual para os trabalhadores de área nuclear é de 20 mSv anual (para um período de cinco anos, ou seja, 100 mSv em 5 anos) e não mais que 50 mSv em um único ano. Já para o público, o limite passa a ser 1 mSv anual, em caso de monitoramento individual. A exposição ocupacional por sua vez, refere-se a todas as exposições de trabalhadores no exercício das suas funções, com exceção da exposição dos mesmos em locais com radiação de BG natural, segundo a ICRP Publication 103 (2007).

A ICPR (1990) e a norma da CNEN-NN-3.01 (2005), por sua vez, classificam as situações de exposição à radiação em práticas e intervenção, consoante as características que conduzem à exposição. Práticas são atividades humanas que poderão aumentar a exposição de indivíduos, quer pela introdução de fontes, quer seja por novas vias de exposição. Já as intervenções são atividades humanas que diminuem a exposição à radiação, quer removendo

fontes já existentes, quer modificando vias de exposição ou reduzindo o número de pessoas expostas.

Conseqüentemente, uma prática caracteriza-se por uma situação de exposição planejada à radiação em que os procedimentos de proteção radiológica devem ser adotados para limitar o potencial de doses a níveis recomendados. Assim, no caso de uma prática, aplicam-se o princípio ALARA, um acrônimo para “tão baixo quanto razoavelmente exequível” o qual abarca três princípios norteadores, a saber: justificativa da prática; otimização da proteção radiológica; e limitação da dose individual. Já para situações de intervenção, procedimentos devem ser adotados para reduzir a dose pré-existente de valores de dose a evitar “*avertable dose*”. Deste modo, a intervenção tem de ser justificada e a medida mitigadora otimizada. Porém, o princípio da limitação de dose individual não se aplica. Existem, contudo, valores de referência para direcionar a não pertinência ou exigência de intervenção, como a média mundial de dose efetiva de 2,40 mSv/a para exposição a fontes naturais em áreas de BG natural, a qual engloba 0,07 mSv/a e 0,41 mSv/a de fontes terrestres externas (*outdoor e indoor*), 0,39 mSv/a de fonte cósmica, 1,26 mSv/a e 0,27 mSv/a de fontes terrestres internas através da inalação e ingestão, respectivamente (UNSCEAR, 2008).

Vale salientar que para os efeitos estocásticos, não existe um limiar de dose para sua ocorrência (CNEN-NN-3.01, 2005) e que as células humanas reagem à ação de baixos níveis de radiação ionizante (CALEGARO, 2007). Assim, populações expostas de forma crônica a baixas doses de radiação, apresentaram alterações nos seus cromossomos, mesmo sendo indivíduos sadios. Essas alterações, por sua vez, poderão desencadear um processo carcinogênico posterior (LITTLE, *et al.*, 2009). A instabilidade genômica refere-se a uma frequência elevada de mutações no genoma, que inclui mudanças nas sequências de ácidos nucleicos e rearranjos cromossômicos. Neste caso, cromossomos dicêntricos (VEREMEYEVA, *et al.*, 2010) podem ser observados. Segundo TANAKA, *et al.*, (2009) tanto os cromossomos dicêntricos como os em anel exercem forte influência sobre o risco do aparecimento do câncer.

Contudo, a maioria das estimativas de risco para o desenvolvimento de câncer radio-induzido é baseada nos sobreviventes das bombas atômicas japonesas através do modelo linear de dose-resposta (LITTLE, *et al.*, 2009). O modelo linear sem limiar de dose – LNT (Linear No-Threshold model) assume que qualquer dose de radiação, mesmo próximo a zero, sempre será considerada danosa. Para LITTLE, *et al.*, (2009), a ausência de riscos significativos de exposição à radiação ionizante não deve ser desprezada. Pois, para se obter

uma estimativa precisa dos riscos após a exposição à baixas doses de radiação, deve-se levar em conta estudos epidemiológicos por um longo período de tempo.

Por outro lado, tem-se em vista que dentre as radiações ionizantes, a radiação gama é a que possui a capacidade de penetrar mais profundamente na matéria, causando danos no núcleo das células dos indivíduos. Veiga e Koifman (2005) avaliaram o padrão de mortalidade por câncer em algumas regiões brasileiras com radioatividade natural elevada, como Poços de Caldas (MG) e Guarapari (ES). Os resultados mostraram que em Poços de Caldas e Guarapari a mortalidade por câncer foi alta. Para Poços de Caldas, observou-se um aumento na mortalidade por câncer de estômago, pulmão, mama e leucemia. Para Guarapari, houve um aumento significativo na mortalidade para os cânceres de esôfago, estômago, pulmão e próstata.

2.2 Pesquisa de urânio no Brasil

A pesquisa de urânio no Brasil teve início em 1952, quando o CNPq (Conselho Nacional de Pesquisas) e o DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral), procurou identificar a existência de urânio no país. Os estudos tiveram início no Planalto de Poços de Caldas, no estado de Minas Gerais, logo após a constatação que a rocha denominada caldasito, explorada há quase meio século como minério de zircônio, continha teores anômalos de urânio.

Em 1956, o CNPq em associação à CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), objetivando determinar o potencial de urânio do Brasil, recorreu à prospecção das áreas potenciais, assumindo para este fim, um convênio com o serviço de pesquisa geológica americana, USGS (U.S. Geological Survey), que durou até a década de 1960. Nesta ocasião, foram feitos registros aereocintilométricos e sondagens geológicas, com cadastros de ocorrências de urânio na Bacia do Parnaíba, que engloba os estados do Pará, Tocantins, Bahia, Ceará, Piauí e Maranhão (região Norte e Nordeste brasileira), a Bacia do Tucano, na Bahia (região Nordeste) e na Bacia do Paraná (região Sul do país) (OLIVEIRA, 2011). Na década 1960 (1961-1966), foi firmado um convênio, desta vez com a França, que juntamente à CNEN, estimulou a participação de geólogos brasileiros na busca por urânio no país. Desta época, destaca-se a identificação de urânio associado ao molibdênio, no Planalto de Poços de Caldas (MG) (OLIVEIRA, 2011).

Na década de 1970, com a reformulação do MME (Ministério das Minas e Energia), foi criada a CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), com o objetivo de executar os trabalhos de pesquisa mineral. Desta forma, a CNEN passou apenas a orientar a

prospecção e pesquisa de urânio. Formada em 1975, a NUCLEBRÁS (Empresas Nucleares Brasileiras S/A), juntamente com a CNEN, investigaram anomalias de urânio no extenso território brasileiro, sendo identificadas dezessete localidades. Em 1989, a NUCLEBRÁS foi substituída pela INB (Indústrias Nucleares do Brasil), uma empresa de economia mista, vinculada à CNEN e, portanto, subordinada ao MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia).

Durante os anos de 1977 a 1982, através de levantamentos aerofotográficos, mapeamento geológico, geofísico terrestre, geoquímico, abertura de poços e galerias, sondagem por cubagem e perfilagem, além de estimativa de reservas, estudos hidrológicos e hidrogeológicos, ensaios de beneficiamento e análises econômicas, foram identificadas jazidas de urânio no território brasileiro em Poços de Caldas-MG, Figueira-PR, Quadrilátero Ferrífero-MG, Amarinópolis-GO, Rio Cristalino-PA, Itaitaia-CE, Lagoa Real-BA e Espinhaços-PB. Este último município, possui uma jazida de urânio com 12 toneladas de reserva (U_3O_8) e teor médio de 1.200 mg.kg^{-1} de urânio (BENTES *et al.*, 1977; SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2006; OLIVEIRA, 2011).

2.3 Mineração e minérios investigados

A Província Pegmatítica da Borborema é uma das mais importantes áreas geoeconômicas dos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, decorrente das inúmeras ocorrências minerais. O setor mineral brasileiro tem grande importância social e econômica para o país, respondendo por 4,2% do PIB e 20% das exportações (IBRAM, 2011; IPEA, 2012). O quantitativo de trabalhadores ligados a campos de minério no Brasil oscila anualmente, de acordo com a economia do país. A exposição dos trabalhadores às radiações ionizantes depende de uma série de fatores, incluindo o tipo de mina, a geologia local e as condições de trabalho.

Os depósitos minerais são concentrações anômalas, ou acumulações locais de rochas e minerais úteis ao ser humano. Os minerais acumulados, podem ser metálicos ou não-metálicos. Nos primeiros, o objeto de interesse é um elemento químico, como por exemplo, na scheelita, o tungstênio (W). Já em relação aos não-metálicos, o objeto é uma propriedade física, como por exemplo, na argila, sua plasticidade. Alguns depósitos de minerais não-metálicos são denominados de depósitos de minerais industriais, que por sua vez, são a matéria prima, insumo ou aditivo de produtos e processos em diversos segmentos industriais, tais como no da tinta, papel, cimento e material de construção, entre outros (CAVALCANTI; ROCHA DA ROCHA, 2010).

Com relação ao Brasil, no seu extenso território (8,5 milhões de km²), são numerosas as instalações que lavram e processam minérios. Dentre as substâncias não energéticas mineradas que destacam o país na área de exportação, tem-se o ferro, nióbio, tantalita, bauxita, manganês, grafite e rochas ornamentais. O Brasil também é mundialmente conhecido como exportador, porém em menor escala de níquel, magnésio, caulim, estanho, vermiculita, cromo e ouro (IBRAM, 2011).

Muitos materiais distribuídos na crosta terrestre contêm quantidades de materiais radioativos de ocorrência natural, os quais recebem o acrônimo NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) e que potencialmente inclui todos os elementos radioativos naturais encontrados no ecossistema, destacando-se os da crosta terrestre (²³⁸U, ²³²Th, além do ⁴⁰K). Alguns, contudo, apresentam radiação em níveis mais altos, porque passaram por processos tecnológicos de extração e beneficiamento, conhecidos por TENORM (Technologically-Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials), ou seja, materiais radioativos de ocorrência natural tecnologicamente modificados.

A extração de recursos naturais para fins econômicos, como mineração e beneficiamento de minério, entre outros, tem aumentado a proporção de NORMs em resíduos, subprodutos ou produtos finais concentrados e gerando por sua vez, os TENORMs. O que aumenta significativamente a exposição dos trabalhadores à radiação ionizante (VEARRIER *et al.*, 2009). Em minas na Alemanha, Tchecoslováquia e nos Estados Unidos, as mortes entre mineradores foram atribuídas ao câncer de pulmão (BODANSHY *et al.*, 1987).

Desta forma, ambos, NORM e TENORM têm o potencial de causar danos importantes à saúde humana. Assim, os princípios do ICRP 60 (ICRP, 1990), devem ser estabelecidos quando se tratar de atividades que englobem estes materiais: “o objetivo principal da radioproteção é prover um nível adequado de proteção ao homem, sem prejudicar excessivamente os benefícios práticos advindos da exposição à radiação”.

Em seguida serão apresentados os minerais e rochas explorados nos campos de mineração deste estudo. Muitos materiais de origem geológica podem apresentar teores anômalos de radioatividade, caso os minerais que os compõem apresentem elementos radioativos em níveis diferenciados.

2.3.1 Caulim

A região do Seridó se destaca pelas inúmeras ocorrências minerais associadas a vários corpos de pegmatitos (SILVA *et al.*, 2008). Entre as suas mineralizações, destacam-se a turmalina, feldspato, caulim, quartzo, mica, água marinha, columbita-tantalita e cassiterita, entre outros (OLIVEIRA *et al.*, 2013). O caulim é um tipo de argila de cor branca ou levemente creme e inodora, sendo formado por silicatos hidratados de alumínio, principalmente a caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Apresenta como subprodutos associados, o quartzo, a mica e o feldspato (depósito primário), além de areia (MME, 2009).

O caulim é utilizado em vários setores industriais, destacando-se o de papel, como elemento de alvura e fixação de impressão. No mercado interno brasileiro, estão amplamente associado à fabricação de cimento e à utilização na indústria de cerâmica branca. Estudos ligados a matérias de construção chamam a atenção para possíveis restrições do uso de alguns materiais em decorrência da presença elevada de radionuclídeos associados (UJIĆ *et al.*, 2010). Desta forma constatou-se que o caulim utilizado em cerâmicas brancas, na decoração de paredes e pisos, pode conter sais de urânio (TODOROVIC; JANKOVIC, 2011).

2.3.2 Granito

Segundo o Serviço Geológico do Brasil, a rocha pode ser definida como uma associação natural de minerais. A rocha ígnea, de composição granítica, é formada a partir do resfriamento ou cristalização do magma e possui caráter ácido, em decorrência da sílica (SiO_2). Na região da Borborema-Seridó, os granitos são constituídos basicamente por minerais de quartzo (conferindo a coloração cinza), feldspato (podendo assim, apresentar diversas tonalidades de cor amarelo, branco, rosa e verde), mica (conferindo a coloração preta ou cinza brilhante) e caulim, entre outros (LIRA; NEVES, 2013; PERLATTI, 2009). Os granitos por sua vez, podem apresentar grandes quantidades de radionuclídeos primordiais (^{238}U e ^{232}Th), juntamente com os seus descendentes e ^{40}K (AMARAL, 1987; 1994).

2.3.3 Feldspato

Os feldspatos compreendem os silicatos de alumínio combinados com sódio, potássio, cálcio e bário (LIRA; NEVES, 2013). Ocorre em várias classes de rochas e são amplamente distribuídos em rochas ígneas e metamórficas como xistos e gnaises, bem como em rochas sedimentares, como arenitos. Sua cor varia geralmente entre o róseo, do tipo potássico (ortoclásios) ou branco, do tipo sódico (plagioclásios) (SAMPAIO, 2008). É amplamente

utilizado na construção civil para ambientação interior e exterior. Na região nordeste, os pegmatitos são as principais fontes comerciais de feldspato.

2.3.4 Scheelita

A scheelita é encontrada nos pegmatitos graníticos e nos depósitos metamórficos. É um mineral que pertence à classe dos tungstatos, que tem por composição o CaWO_4 . A maior parte das jazidas de tungstênio (W) no mundo foi encontrada em veios de granitoides e quartzo. Pode ser de cor branca, amarela, verde ou castanha (GERAB, 2014). A região do Seridó no Estado do Rio Grande do Norte apresenta o maior depósito de minério de tungstênio do Brasil (CANO, 2012).

O tungstênio obtido a partir da scheelita é utilizado na produção de lâmpadas e canetas, dentre outros. O beneficiamento da scheelita é um processo ainda rústico e envolve em sua maioria, equipamentos que trabalham por processos gravimétricos, como mesas vibratórias. Em geral, 99,2% do material extraído e tratado no processo de beneficiamento é desperdiçado e apenas 0,8% é o representativo da scheelita. Estima-se que o resíduo do processo de beneficiamento esteja na ordem milhões de toneladas (GERAB, 2014).

2.4 Unidades e Grandezas dosimétricas

2.4.1 Exposição (X)

A grandeza exposição indica a capacidade de fótons ionizarem o ar. Em que dQ é a soma de todas as cargas de mesmo sinal criadas no ar quando todos os elétrons, independentemente da carga, liberados por fótons em um volume dV de ar de massa dm , são completamente freados nesse volume, expressa na equação 1 (ICRP Publication 103, 2007).

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (1)$$

A unidade de exposição foi definida como röntgen (R), entretanto sua nova unidade no Sistema Internacional de unidades (S.I.) é o C.kg^{-1} .

2.4.2 Dose Absorvida (D)

Com o desenvolvimento da radioproteção, surgiu a necessidade da utilização de grandezas físicas que possibilitem mensurar a radiação ionizante. O dano decorrente da exposição à radiação depende da energia média depositada pela radiação incidente em um

volume de matéria de massa. Assim, surgiu o conceito de rad (radiation absorbed dose), em português, dose de radiação absorvida, como unidade de Dose Absorvida. No S.I., utiliza-se o gray (Gy), em que, $1\text{Gy} = 100 \text{ rad}$.

Assim, a Dose Absorvida é definida como sendo a energia média depositada, dE , pela radiação incidente em um volume elementar de matéria de massa dm , calculada pela Equação 2 (ICRP Publication 103, 2007).

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2)$$

A Dose Absorvida no S.I. é expressa em termos de energia absorvida por unidade de massa do tecido, a saber: joule por kilograma (J.kg^{-1}), que representa o gray (Gy).

2.4.3 Dose Equivalente (H)

Com relação à radioproteção, o rad é uma unidade utilizada para medir os raios gama, pois o dano biológico causado é proporcional à energia depositada. Contudo, em casos de partículas alfa, por ser mais fortemente ionizante, esta proporcionalidade não é aplicada. Assim, para se avaliar o efeito das radiações se fez necessário o estabelecimento da grandeza Dose Equivalente (H), correspondente à Dose Absorvida (D), modificada pelo fator de qualidade Q (ICRP Publication 103, 2007), expressa pela Equação 3.

$$H = D \times Q \quad (3)$$

2.4.4 Dose Efetiva (E)

É a soma das doses equivalentes ponderadas nos órgãos e tecidos do corpo, dada pela equação 4 (ICRP Publication 103, 2007).

$$E = \sum_T w_T \times H_T \Leftrightarrow E = \sum_T w_T \sum_R w_R \times D_{T,R} \quad (4)$$

Em que, E é a Dose Efetiva dada em sievert (Sv), w_T é o fator de ponderação tecidual, H_T é a grandeza Dose Equivalente e $D_{T,R}$ é a Dose Absorvida média em um órgão T devido à radiação R .

2.5 Detetores de radiação

Os sistemas detetores de radiação são dispositivos sensíveis à radiação ionizante, integrados a um sistema de leitura (medidor). Há vários tipos de materiais detetores, entre eles, os contadores de cintilação, os semicondutores e os termoluminescentes. Contudo, seja qual for o tipo detetor, os seguintes pontos devem ser levados em consideração, segundo a IAEA (2003) tipo de radiação, uma vez que interagem de forma diferente com a matéria; tipo de informação desejada, se número de contagens, ou energia da radiação detectada; intervalo de tempo de interesse, se em medições "instantâneas", em que são utilizados os detetores de leitura direta (ativos), como por exemplo, os detetores cintilométricos; ou medições longas, para registrar a radiação acumulada durante um período de tempo, e que possa ser processada posteriormente (detetores passivos), como por exemplo, detetores termoluminescentes; condições de trabalho do detetor, que possa apresentar robustez, portabilidade e autonomia; precisão, exatidão, além de boa resolução; características operacionais e custo adequado. Ainda, segundo IAEA (2003), os detetores de radiação devem apresentar nas suas seqüências de medição:

- a. Repetitividade - Características relacionadas ao grau de concordância dos resultados obtidos, sob as mesmas condições de medição;
- b. Reprodutibilidade - Grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição;
- c. Estabilidade - Capacidade de conservar constantes suas características de medição ao longo do tempo;
- d. Exatidão - Grau de concordância dos resultados com o valor de referência a ser determinado;
- e. Precisão - Grau de concordância dos resultados entre si;
- f. Razão entre a variação da resposta do detetor e a variação do estímulo (sensibilidade);
- g. Capacidade de converter em sinais de medição os estímulos recebidos (eficiência).

2.5.1 Detetor cintilador NaI(Tl) e BGO

Nos levantamentos de exposição ambiental, o monitoramento com detetores cintiladores é uma prática comum em decorrência de sua eficiência (RAFIQUE, *et al.*, 2014; HOSODA *et al.*, 2015). Há dois grupos de detetores de cintilação: os orgânicos e os inorgânicos. O primeiro, geralmente constituído por moléculas orgânicas na forma líquida (NE 213, NE 226), ou em materiais sólidos como plástico (NE 102, NE 105). No segundo grupo, tem-se entre outros, os detetores NaI(Tl) (iodeto de sódio dopado com tálio); CsI(Tl) (iodeto de céσιο dopado com tálio); CsI(Na) (iodeto de céσιο dopado com sódio); e Bi₄Ge₃O₁₂ (BGO: germanato de bismuto) (IAEA, 2003).

O cristal NaI(Tl) apesar de ser higroscópico, o que requer sua manipulação em atmosfera controlada e em recipientes selados (PANI, *et al.*, 2011), é aceito como material apropriado para cintilação na espectrometria da radiação gama (IAEA, 2003). Os detetores cintiladores utilizam materiais que absorvem a energia da radiação ionizante e a converte em luz. A eficiência da cintilação é definida como a fração de número de fótons visíveis pela energia incidente (Fóton/MeV). Embora o número de fótons produzidos seja a função da energia transferida pela radiação incidente, a energia dos fótons depende apenas dos níveis de energia no cristal de cintilação.

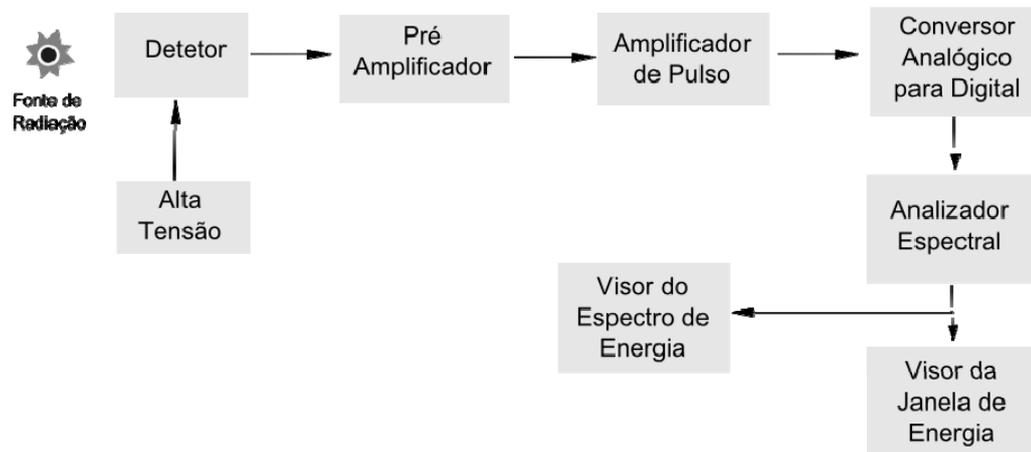
Um dispositivo fundamental para a utilização dos detetores à cintilação é o tubo fotomultiplicador. Após a interação da radiação com o cintilador, a fotomultiplicadora transforma os sinais luminosos em elétrons, através do fotocátodo. Por sua vez, os fotoelétrons são multiplicados pelos dinodos gerando pulsos de corrente.

Os espectrômetros de raios gama são caracterizados por sua proporcionalidade entre a energia de raios gama que são detetados e a amplitude do pulso gerado. A precisão com a qual um espectrômetro pode distinguir as fontes de radiação gama com energias próximas, é conhecida como a resolução de energia (R), definida como a largura a meia altura do pico de absorção total. As resoluções típicas para detetores de NaI(Tl) são de 10%, sendo especificados pela resolução de energia do ¹³⁷Cs (KNOLL, 2000). O analisador espectral multicanal discrimina as regiões de energia de interesse.

Os espectrômetros de raios gama mais utilizados apresentam 512 canais para registro dos raios gama absorvidos na faixa de energia 0 – 3,0 MeV (IAEA, 2003). Desta forma, com uma pequena cintilação inicial no fotocátodo, a fotomultiplicadora origina centenas de elétrons que irão produzir um pulso de corrente a ser amplificado, analisado por conversor analógico-digital e apresentados como um espectro de energia de raios gama relacionado à radiação detectada. Como os radionuclídeos emitem energias específicas de raios gama, seus

espectros podem ser utilizados para diagnosticar a fonte de radiação. A Figura 5 descreve através de diagrama, o funcionamento de um espectrômetro de raios gama.

Figura 5 - Diagrama de blocos de um espectrômetro de raios gama.



Fonte: Adaptado de TECDOC-1363, IAEA (2003)

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

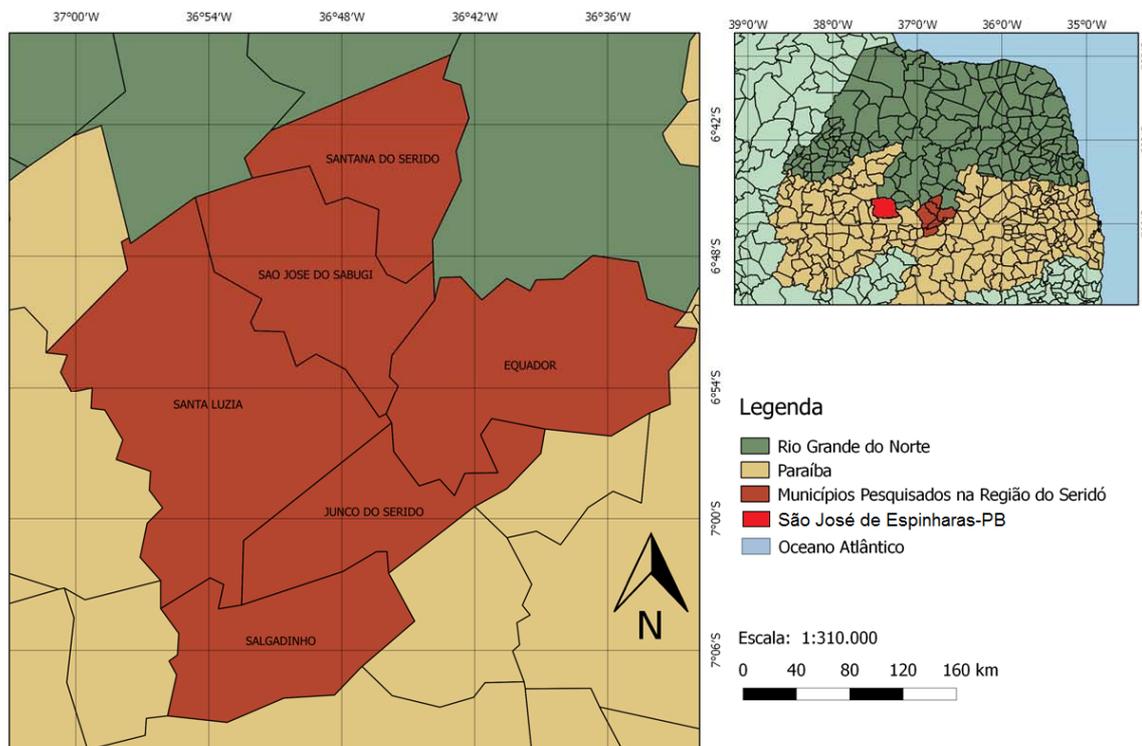
A área de estudo abrange os municípios de Junco do Seridó, Salgadinho, Santa Luzia e São José do Sabugi, no estado da Paraíba (PB) e os municípios Equador e Santana do Seridó no estado do Rio Grande do Norte (RN). Os campos de mineração da região potiguar foram incluídos, devido à limitação de acesso às minas pelos administradores dos outros locais, a fim de melhorar a confiabilidade da avaliação da região e aumentar o banco de dados.

A escolha dos campos de mineração no Seridó, levou em consideração os valores das taxas de doses efetivas identificadas em outros estudos realizados na jazida de São José de Espinharas-PB, com variação de taxa de dose efetiva de 3,79 a 93,80 mSv/a e média de 19,47 mSv/a (SILVA, *et. al.*, 2014). Tendo em vista os elevados valores nesta jazida, o presente trabalho buscou estimar os valores médios das taxas de doses efetivas em campos de mineração na região do Seridó. As distâncias lineares da jazida são: Santa Luzia (44,40 km); São José do Sabugi (58,20 km); Salgadinho (60,07 km); Junco do Seridó (69,38 km); no estado da Paraíba (PB) e os municípios Santana do Seridó (65,36 km) e Equador (67,76 km); no estado do Rio Grande do Norte (RN), todos na região do Seridó.

A região do Seridó faz parte da mesorregião da Província da Borborema e abarca dois estados do nordeste brasileiro: na Paraíba, abrange 26 municípios e no Rio Grande do Norte, 28 municípios. O conjunto dos municípios dentro da região do Seridó é mencionado segundo o estado e pontos cardeais, sendo identificados como Seridó Ocidental Paraibano ou Seridó Oriental Paraibano e Seridó Ocidental Potiguar ou Seridó Oriental Potiguar. A área de estudo delimitada correspondeu aos paralelos 07°06' de latitude Sul e pelos meridianos 37°00' de longitude Oeste. A localização dos municípios investigados nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, bem como São José de Espinharas-PB, é mostrada na Figura 6, que foi gerada pelo “software” livre Quantum GIS.

A região do Seridó é caracterizada pela vegetação de caatinga, que em tupi-guarani significa “floresta branca”, em decorrência da vegetação, que na estação seca e sem folhagem, revela troncos de cor branca. A região tem como propulsores do desenvolvimento local a agropecuária e o garimpo. Com relação à mineração, a região apresenta atividades ligadas a rochas ornamentais, minerais metálicos, gemas e industriais (BEZERRA JÚNIOR e SILVA 2007; IDEMA, 2015).

Figura 6 - Localização dos municípios investigados da região do Seridó nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte.



Fonte: Próprio autor.

3.1.1 Caracterização dos municípios

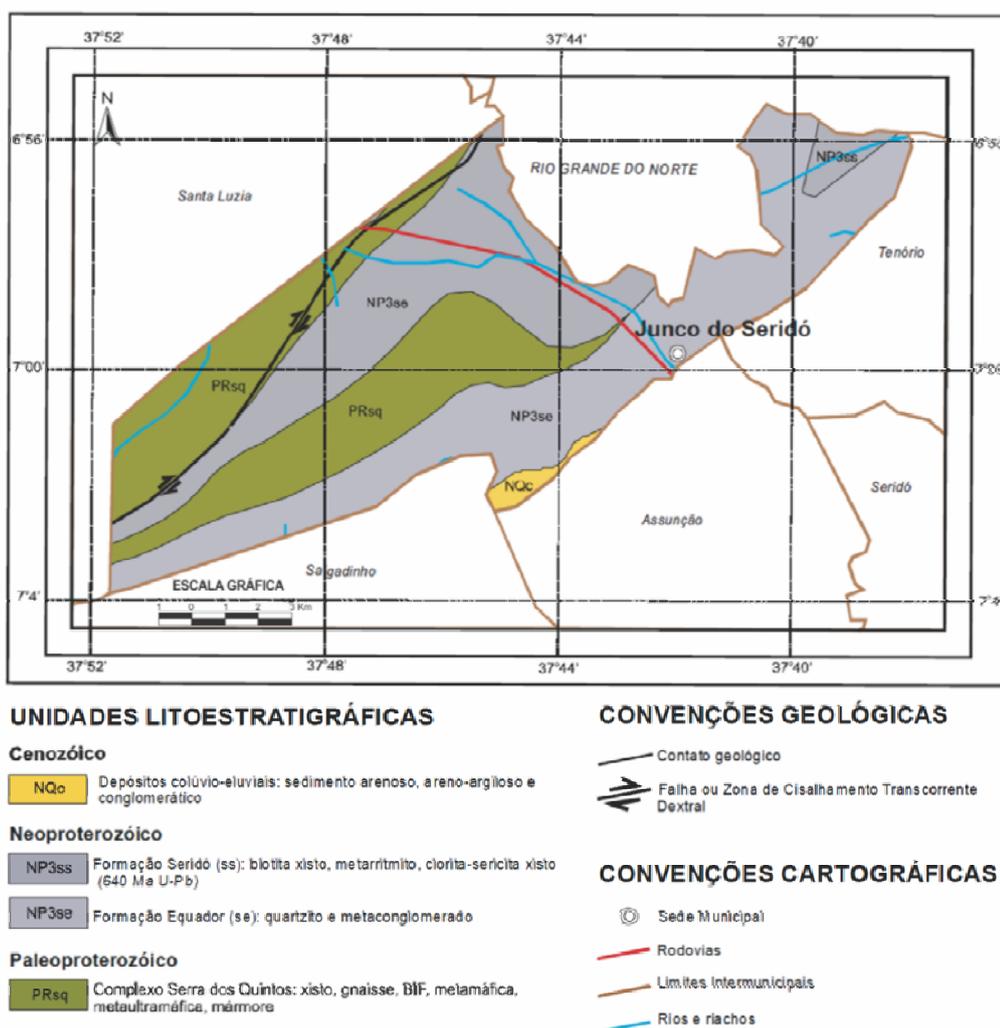
O município de Junco do Seridó possui uma área de 160,10 km² e situa-se na porção central-norte do Estado da Paraíba, Meso-Região da Borborema e Micro-Região do Seridó Oriental Paraibano. A partir de João Pessoa, o acesso é realizado através da rodovia federal BR-230, Leste-Oeste, em um trecho de 265 km, que passa por Campina Grande, Soledade e Juazeirinho (IBGE, 2010).

Quanto aos aspectos socioeconômicos, de acordo com o censo de 2010, a população total residente era de 6.643 habitantes. Possui a agricultura como base econômica, sendo desenvolvida através de plantações de feijão, milho, mandioca e algodão. Na pecuária, se destacam a criação de bovinos e na avicultura, a criação de galináceos com produção de ovos (IBGE, 2010).

Com relação aos aspectos fisiográficos, Junco do Seridó está inserido no Polígono das Secas. Seu clima é do tipo semi-árido e quente, com chuvas de verão. A vegetação é do tipo Caatinga-Seridó e a temperatura média é de 25° C. Quanto ao relevo, é levemente ondulado a

Nordeste, Sudeste e Noroeste; no Sudoeste varia de ondulado a muito ondulado, onde se localiza a Serra da Borborema. O município encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do rio Paraíba, sub-bacia do rio Taperoá e todos os cursos de água têm regime de fluxo intermitente, com padrão de drenagem do tipo dendrítico (IBGE, 2010; CPRM, 2005). A geologia de Junco do Seridó é mostrada na Figura 7, onde se destacam a presença de xistos, gnaisses, quartzitos e sedimentos arenosos entre outros.

Figura 7 - Mapa geológico de Junco do Seridó-PB.



Fonte: CPRM (2005)

O município de Salgadinho possui uma área de 179,6 km² e localiza-se na região central do Estado da Paraíba, Meso-Região Borborema e Micro-Região do Seridó Ocidental Paraibano. A partir de João Pessoa, o acesso é feito através da rodovia federal BR-230, Leste-

Oeste, em trecho de 250 km até Assunção, passando por Campina Grande, Soledade e Juazeirinho. A partir de Assunção, serão percorridos mais um trecho de 30 km pela rodovia estadual PB-288 (IBGE, 2010).

Quanto aos aspectos socioeconômicos, de acordo com o censo 2010, Salgadinho possui uma população de 3.508 habitantes. Na agricultura se destacam as culturas de algodão, feijão, milho, arroz e sisal. A pecuária envolve a criação de bovinos e caprinos e na avicultura, a criação de galináceos com produção de ovos (IBGE, 2010).

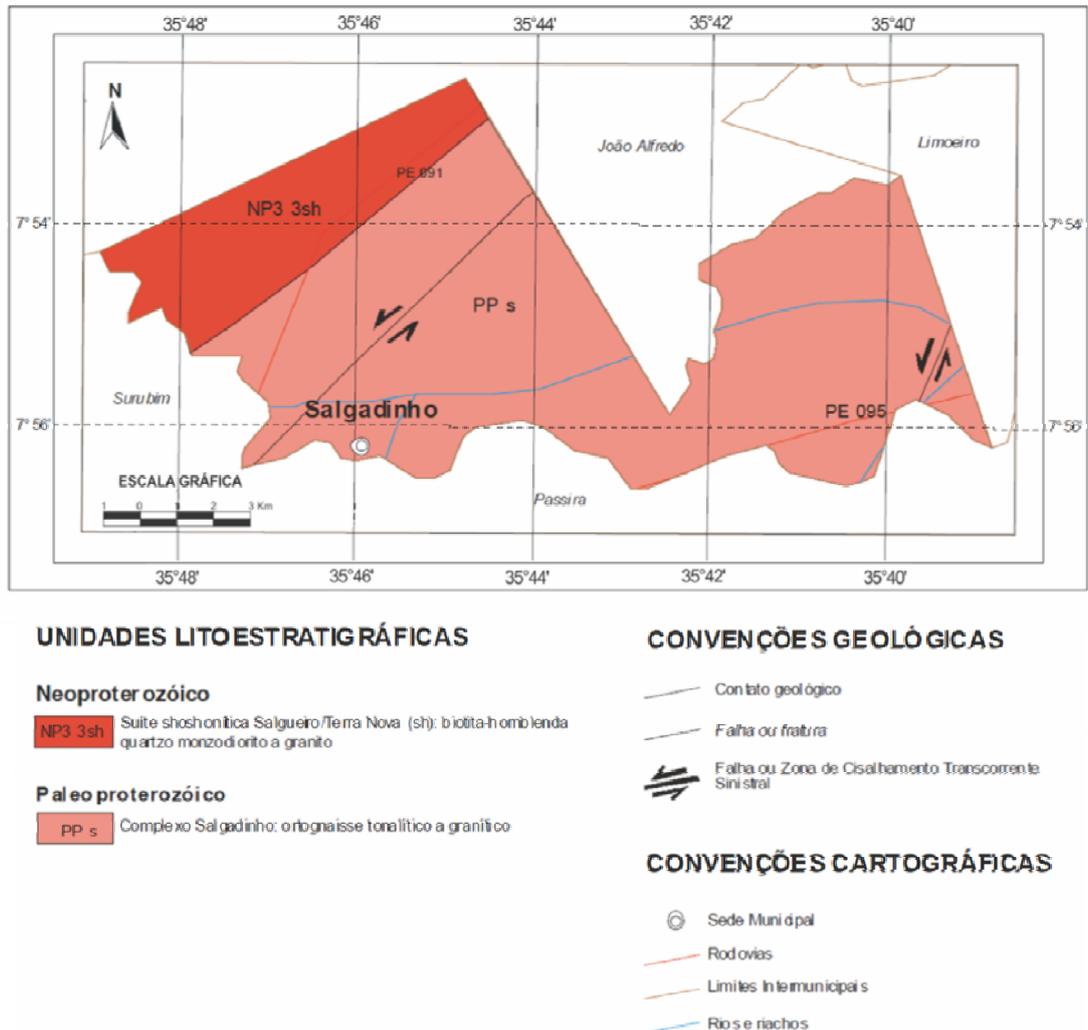
Com relação aos aspectos fisiográficos, Salgadinho está inserido no Polígono da Seca. Possui um clima Tropical, quente e seco, com chuvas de verão. A vegetação é do tipo Caatinga Hiperxerófila do Seridó, com temperatura média anual de 25° C. O município encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Piranhas, sub-bacia do Rio Espinharas. Todos os cursos de água têm regime de escoamento intermitente, com padrão de drenagem dendrítico (IBGE, 2010; CPRM, 2005). Sua geologia é mostrada na Figura 8, onde se destacam a presença de ortognaisses, quartzos e granitos.

O município de Santa Luzia possui área de 226,30 km² e localiza-se na região Central-Norte do Estado da Paraíba, Meso-Região Borborema e Micro-Região Seridó Ocidental Paraibano. O acesso a partir de João Pessoa é feito através da rodovia Federal BR-230, em trecho de 287 km até chegar à cidade de Santa Luzia sede do município, passando por Campina Grande, Soledade e Junco do Seridó (IBGE, 2010).

Quanto aos aspectos socioeconômicos, de acordo com o censo de 2010, a população total residente é de 14.729 habitantes. Na agricultura se destacam as plantações de algodão, milho feijão e arroz. Na pecuária, ressalta-se a criação de bovinos e na avicultura, a criação de galináceos com produção de ovos (IBGE, 2010).

Com relação aos aspectos fisiográficos, o município de Santa Luzia está inserido no Polígono das Secas. Possui um clima Tropical, quente seco, semi-árido com chuvas de verão. A vegetação é do tipo Caatinga-Seridó. A topografia apresenta-se com relevo ondulado à fortemente ondulado nas porções sudoeste, onde ocorrem as serras do Pilãozinho e do Riacho do Fogo. Na porção norte, o relevo apresenta-se ondulado, ao sul, onde ocorrem as serras do Pinga e da Borborema, as cotas chegam a 880 metros. A temperatura média anual é de 28° C.

Figura 8 - Mapa geológico de Salgadinho-PB.

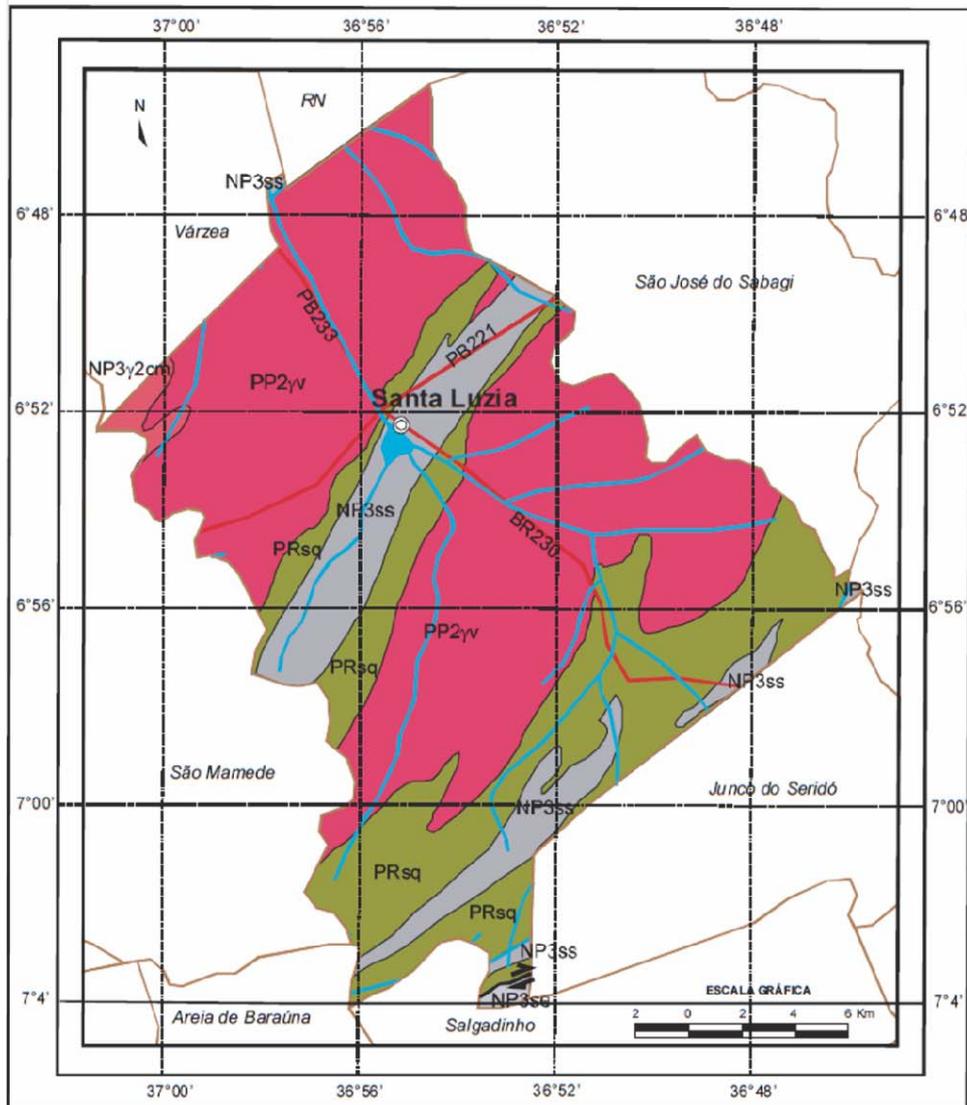


Fonte: CPRM (2005)

O município encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Piranhas, sub-bacia do Rio Seridó. Todos os cursos de água têm regime de escoamento intermitente e o padrão de drenagem é dendrítico (IBGE, 2010; CPRM, 2005). A geologia de Santa Luzia é mostrada na Figura 9, onde se percebe uma grande formação granítica, além de xistos.

O município de São José do Sabugi possui uma área de 215,4 km² e situa-se na região Centro-Norte do Estado da Paraíba, Meso-Região Borborema e Micro-Região Seridó Ocidental Paraibano. O acesso ao município a partir de João Pessoa pode ser feito através da BR-230, Leste-Oeste, em percurso de 299 km até a cidade de Santa Luzia, passando por Campina Grande, Soledade, Juazeirinho, Assunção e Junco do Seridó. A partir de Santa Luzia, segue na direção nordeste, em trecho de 18 km até São José do Sabugi (IBGE, 2010).

Figura 9- Mapa geológico de Santa Luzia-PB.



UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Neoproterozóico

- NP3 γ 2cm Suite calcálcina de médio a alto potássio Itaporange (cm); granito e granodiorito porfirítico associado a diorito (588 Ma U-Pb)
- NP3ss Formação Seridó (ss): bictita xisto, metarrilito, clorita-sericita xisto (640 Ma U-Pb)
- NP3se Formação Equador (se): quartzito e metaconglomerado

Paleoproterozóico

- PP2 γ v Suite Várzea Alegre ortogneisse TTG e migmatito de protólito gabrólico e diorítico
- PRsq Complexo Serra dos Quintos: xisto, gnaisse, BIF, metamáfica, metaultramáfica, mármore

CONVENÇÕES GEOLÓGICAS

- Contato geológico
- Falha ou Zona de Cisalhamento Transcorrente Dextral

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

- Sede Municipal
- Rodovias
- Limites Intermunicipais
- Rios e riachos
- Açude/barragem

Fonte: CPRM (2005)

Quanto aos aspectos socioeconômicos, de acordo com o censo de 2010, a população total residente é de 4.010 habitantes. Por sua vez, as principais atividades econômicas se relacionam a agropecuária e comércio varejista. Na agricultura se destacam as culturas de algodão, feijão, milho e arroz. Na pecuária, destaca-se a criação de bovinos e na avicultura, a criação de galináceos com produção de ovos (IBGE, 2010, CPRM, 2005).

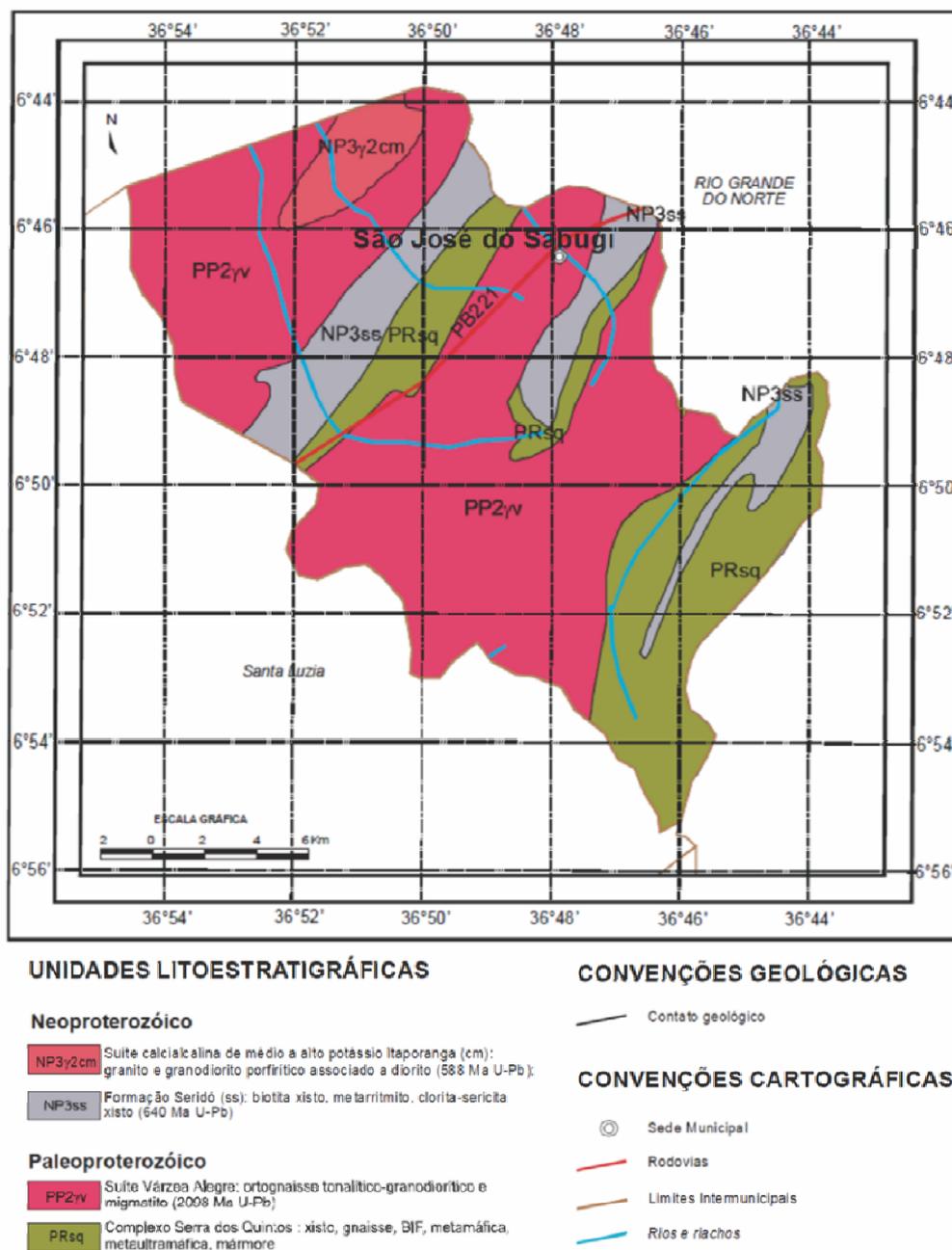
Com relação aos aspectos fisiográficos, possui clima muito quente e semiárido. Sua formação vegetal é do tipo caatinga Hiperxerófila, com abundância de cactáceas e plantas de porte mais baixo, destacando-se a jurema preta, xique-xique e facheiro. Os solos predominantes são de textura arenosa e argilosa, sendo aproveitado para a pecuária. Sua topografia é caracterizada por relevos de 200 a 400 metros de altitude. A temperatura média anual é de 27° C. O município encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Piranhas, sub-bacia do Rio Seridó. Todos os cursos de água do município têm regime intermitente e o padrão de drenagem é dendrítico (IBGE, 2010; CPRM, 2005). A geologia de São José do Sabugi é mostrada na Figura 10, onde se destacam a presença de gnaisses, xistos e granitos.

O município de Equador possui uma área de 312 km² e situa-se na mesorregião Central Potiguar e na microrregião do Seridó Oriental. Seu acesso, a partir de Natal pode ser feito através das rodovias BR-226, BR-427 e RN-086 (IBGE, 2010).

Quanto aos aspectos socioeconômicos, segundo o censo de 2010, a população total residente é de 5.822 habitantes. As principais atividades econômicas do município estão vinculadas a agropecuária, extrativismo, comércio e mineração (IBGE, 2010). Com relação aos aspectos fisiográficos, o clima é muito quente e semiárido, com temperatura média de 27° C. Sua formação vegetal é do tipo Caatinga Hiperxerófila, de caráter mais seco, com abundância de cactáceas e plantas de porte mais baixo e espalhadas. Os solos têm fertilidade natural, com textura arenosa e de fase pedregosa e rochosa. Seu relevo é forte ondulado e montanhoso, erodidos e drenado, possuindo entre 400 a 800 metros de altitude. O município encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica Piranhas-Açu, sendo banhado pelas sub-bacias dos rios Malhada Grande e dos Quintos.

Seu domínio hidrogeológico é do tipo intersticial e fissural. O primeiro, composto de rochas sedimentares, já o segundo, composto de rochas que englobam o sub-domínio rochas metamórficas e ígneas dos granitoides (IBGE, 2010; CPRM, 2005). A geologia de Equador é mostrada na Figura 11, onde se destaca a presença de xistos e quartzitos, além de formações sedimentares-arenosas e areno-argilosas, com faixa granitóite.

Figura 10 - Mapa geológico de São José do Sabugi-PB.

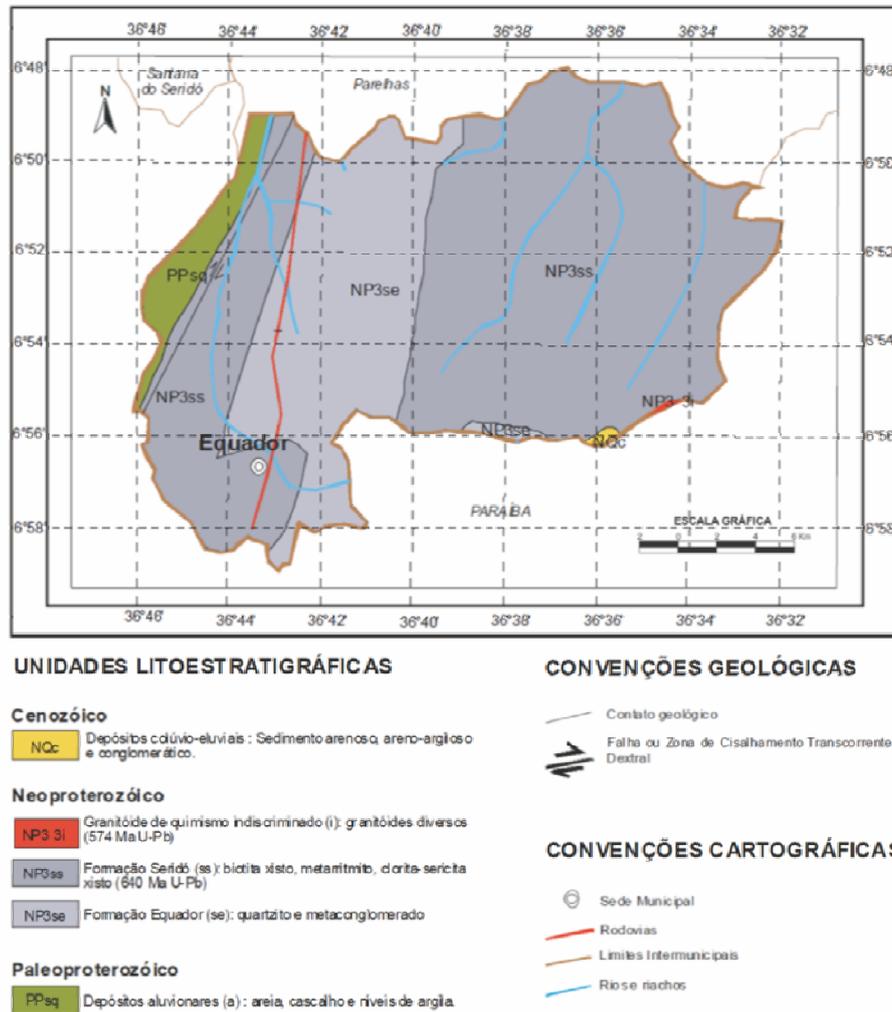


Fonte: CPRM (2005)

O município de Santana do Seridó abrange uma área de 170 km² e situa-se na mesorregião Central Potiguar e na microrregião do Seridó Oriental. A partir de Natal, seu acesso pode ser realizado através das rodovias BR-226, BR-427 e RN-086 (IBGE, 2010).

Quanto aos aspectos socioeconômicos, segundo o censo de 2010, a população total residente é de 2.526 habitantes. As principais atividades econômicas do município são a agropecuária, comércio e extrativismo mineral (IBGE, 2010).

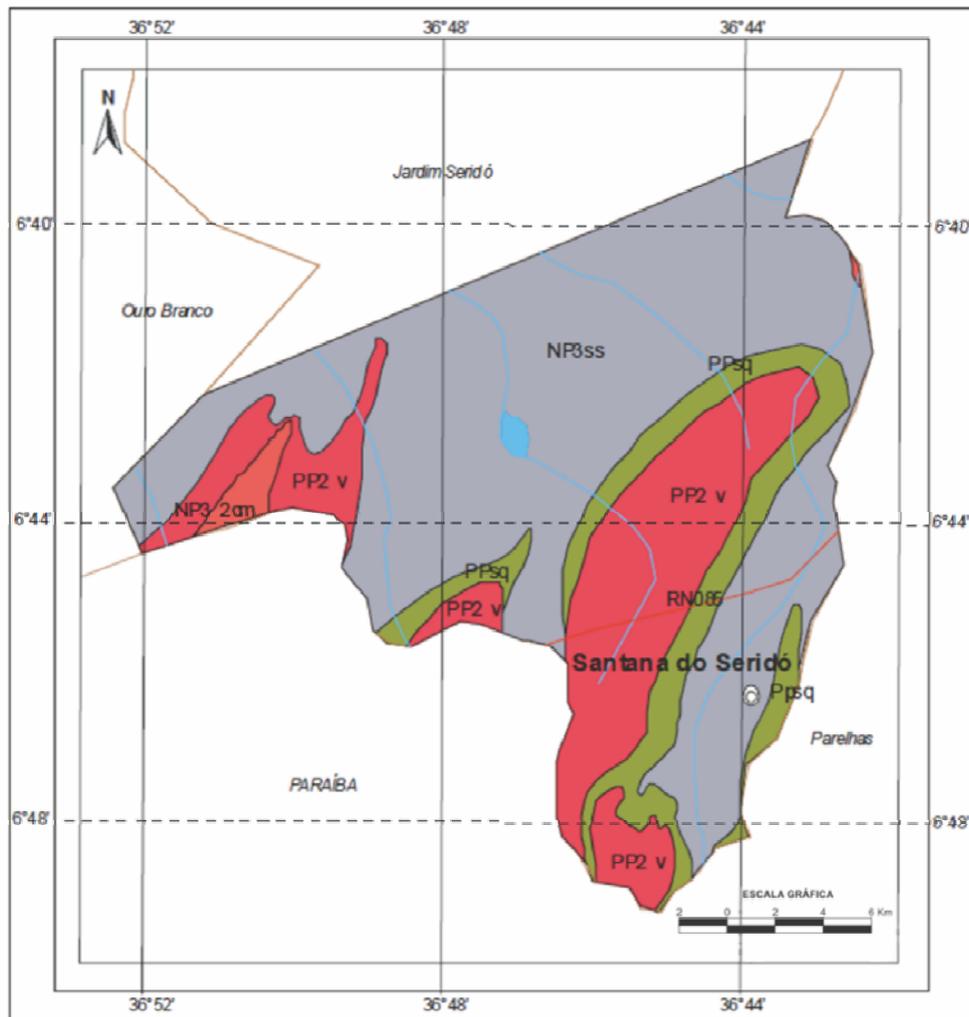
Figura 11 - Mapa geológico de Equador-RN.



Fonte: CPRM (2005)

A temperatura média do município é de 28 °C. Com relação aos aspectos fisiográficos, encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica Piranhas-Açu, sendo banhado pela sub-bacia do Rio Seridó. O padrão de drenagem é dendrítico e todos os cursos de água tem regime intermitente. O município está inserido no domínio hidrogeológico fissural, composto de rochas que englobam o subdomínio de rochas metamórficas e ígneas (IBGE, 2010; CPRM, 2005). A geologia de Santana do Seridó é mostrada na Figura 12, onde se percebe forte presença de xistos e ortognaisses.

Figura 12 - Mapa geológico de Santana do Seridó-RN.



UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Neoproterozóico

NP3 2cm Suite calcálica na demência alta potássio (cm); granito e granodiorito porfirítico associada a diorito (568 Ma U-Pb)

NP3ss Formação Seridó (ss): biotita-xisto, metarritmto, clorita-sericita-xisto (840 Ma U-Pb)

Paleoproterozóico

PP2 v Suite Vã zea Grande: ortogneisse tonalítico-granodiorítico e migmatito (2088 Ma U-Pb)

PPsq Complexo Serra dos Quíntos: xisto, gnaiss, BF, metamáfica, metultramáfica, mármore

CONVENÇÕES GEOLÓGICAS

— Contato geológico

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

⊙ Sede Municipal

— Rodovias

— Limites intermunicipais

— Rios e riachos

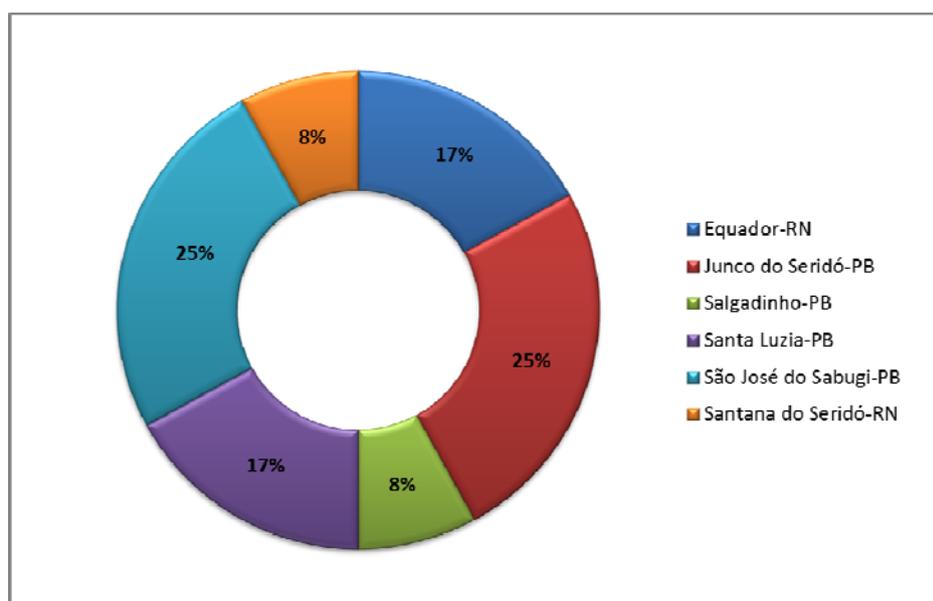
— Açude/barragem

Fonte: CPRM (2005)

Das doze minas investigadas, houve uma maior participação em termos de amostragem, para os municípios de Junco do Seridó-PB (minas: C/caulim, F/granito, H/feldspato) e São José do Sabugi-PB (minas: G/granito, J/feldspato, M/scheelita), com um percentual de 25% cada, seguidos de Equador-RN (minas A e B/caulim) e Santa Luzia-PB (minas: E/granito, L/scheelita), com aproximadamente 17% cada; e por fim, Salgadinho-PB

(mina D/ caulim) e Santana do Seridó-RN (mina I/feldspato), com 8% cada, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Contribuição de amostragem das doze minas investigadas em Equador-RN, Junco do Seridó-PB, Salgadinho-PB, Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB e Santana do Seridó-RN.



Fonte: próprio autor.

3.2 Sistema de Medições

O sistema de medições utilizado na radiometria ambiental externa, é composto por um detector gama do tipo discriminador com sonda combinada, modelo *Gamma Surveyor*®, pertencente ao Grupo de Estudos em Radioecologia (RAE), vinculado ao DEN (Departamento de Energia Nuclear) - UFPE, ver Figura 14.

O sistema de medição é composto por uma unidade de controle (cor preta), com dimensões de 25,6 x 9,0 x 6,0 cm e massa de 0,5 kg, acoplada a uma sonda gama (cor laranja) com dimensões de 9,0 x 12,0 x 29,0 cm, altura de punho de 18,0 cm e massa de 1,6 kg. A unidade de controle do sistema dispõe de uma capacidade de memória máxima de 32 Mbit para armazenamento dos dados e pode ser interligada a um computador por cabo USB e a um sistema GPS. A sonda do sistema, por sua vez, é composta por cintiladores do tipo NaI(Tl) e BGO (germanato de bismuto), com volumes de 350 cm³ e 103 cm³, respectivamente. Esta sonda registra uma taxa de contagem máxima de 250.000 pulsos por segundo, abrange uma faixa de energia de 100 keV a 3 MeV e possui um analisador multicanal com 512 canais (MANUAL GF INSTRUMENTS, 2015).

Figura 14 - Espectrômetro gama da GF Instruments®.



Fonte: Manual GF Instruments.

O sistema ainda dispõe de vantagens operacionais como tempo morto desprezível, bateria recarregável de 12 V, fácil manuseio e manutenção, análises de baixo custo e calibração em energias de forma eficaz; além de ser portátil, o que proporciona medições “*in situ*”, com a localização de áreas que apresentam níveis diferenciados de radiação natural. Calcula as concentrações do K (%) diretamente, utilizando a emissão gama do ^{40}K e do U (mg.kg^{-1}) e Th (mg.kg^{-1}), estes últimos, calculados indiretamente pela detecção dos radioisótopos ^{214}Bi e ^{208}Tl , respectivamente, pois fazem parte das séries de desintegração radioativas dos mesmos. Os valores das taxas de dose absorvidas (nGy.a^{-1}) são calculados de acordo com as recomendações do documento técnico IAEA-1363 (IAEA, 2003).

3.2.1 Calibração do detetor cintilador NaI(Tl) e BGO

Os detetores cintiladores devem ser calibrados periodicamente por laboratório credenciado por órgão oficial, a fim de estabelecer a fidedignidade dos valores obtidos em campo. Desta forma, o detetor utilizado neste trabalho, foi calibrado no Laboratório de Metrologia de Radiações Ionizantes (LMRI) do DEN-UFPE, sob certificação nº 6490/0911 (LMRI, 2011). No procedimento de calibração foi utilizada uma fonte de ^{137}Cs , cujas características são apresentadas na Tabela 3.

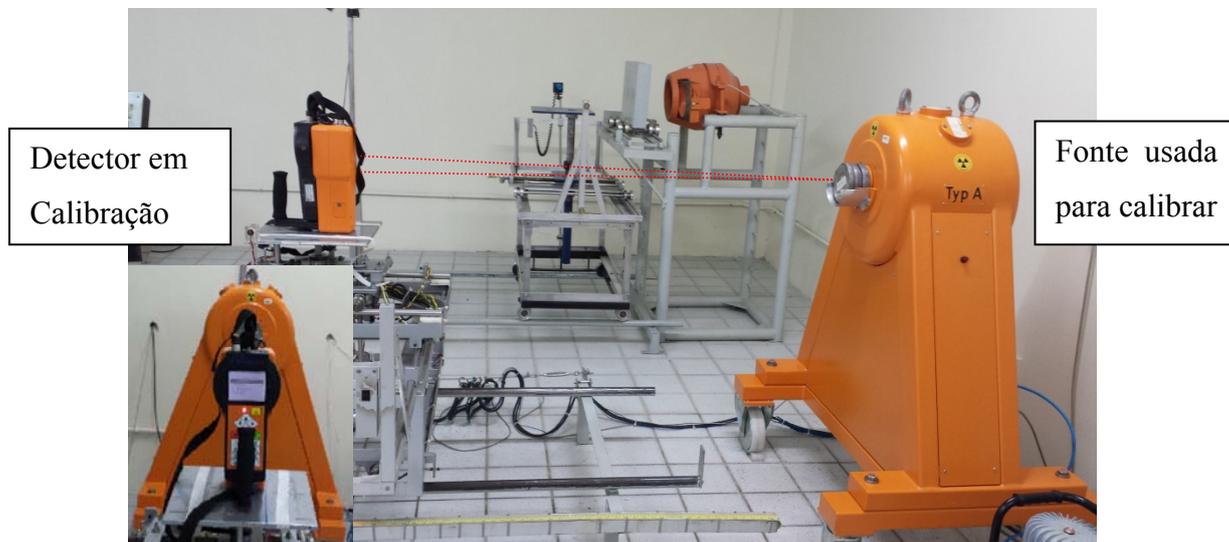
Tabela 3 - Características da fonte de ^{137}Cs utilizada na calibração.

TAXA DOSE AR (mGy.h^{-1})	DATA REFERÊNCIA	ENERGIA (keV)	MEIA-VIDA (ano)	Γ $\text{C/kg.m}^2(\text{Bq.h}^{-1})$
34,4	09/12/2013	661,7	30,2	2,30E-15

Fonte: SILVA (2014).

A geometria de calibração utilizada foi do tipo eixo longitudinal, com o detetor perpendicular ao feixe de radiação, tendo como ponto de referência o centro geométrico do volume sensível. O valor médio para medição da radiação de fundo do laboratório foi $0,18 \mu\text{Gy.h}^{-1}$ e as taxas de doses no ar utilizadas na calibração foram de 2,0; 5,0; 8,0; 16,0; e $20,0 \mu\text{Gy.h}^{-1}$, em função da distância fonte-detetor, com incertezas de 2,4%; 2,2%; 2,1%; 1,9% e 1,9%, respectivamente. Ver Figura 15.

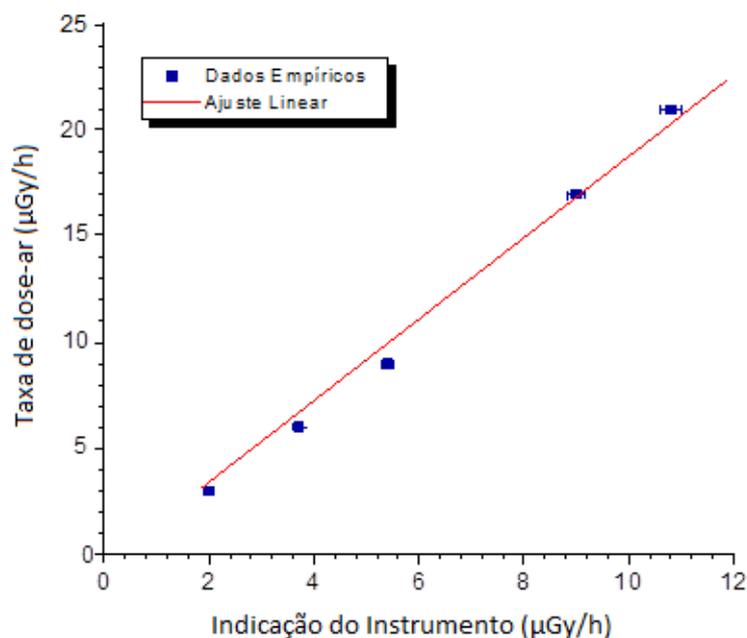
Figura 15 – Representação das condições de calibração segundo a geometria e ponto de referência.



Fonte: SILVA (2014).

A partir do procedimento de calibração estabelecido, foi possível a construção da reta de calibração representada na Figura 16, que correlaciona à indicação do instrumento e a taxa de dose no ar. A reta de calibração apresentou um coeficiente de correlação linear (r) de 0,9942.

Figura 16 – Gráfico de resposta do espectrômetro gama portátil.



Fonte: LMRI (2011).

Para o cálculo da taxa de dose efetiva (mSv/a), com base nos parâmetros de coeficiente angular de 1,92295 (não representada na reta, por se tratar de uma calibração intermediária) e coeficiente linear de 1430,8, foi determinada a Equação 5 (SILVA, 2014).

$$\dot{H}_E = (1,92295 \times \dot{D} - 1430,87) \times 0,00614 \quad (5)$$

Nessa equação empírica, \dot{H}_E representa a taxa de dose efetiva ambiental corrigida com resultado em mSv/a e \dot{D} para a taxa de dose absorvida medida experimentalmente em nGy.h⁻¹. Essa taxa foi ajustada por um fator de 0,00614 que leva em consideração o fator de conversão de doses de 0,7 Sv/Gy, um fator de conversão de unidades de medidas 10⁻⁶, para converter nano em mili, um tempo de exposição de 8.766 horas por ano e o fator 1 de ocupação, caracterizando o pior cenário possível.

3.2.2 Monitoração ambiental

As medições ambientais foram realizadas “*in situ*”, de forma sistemática, nas minas de exploração de caulim, granito, feldspato e scheelita, na região do Seridó paraibano e potiguar. Devemos evidenciar que todas as minas investigadas neste trabalho foram a céu aberto. Os

ensaios radiométricos foram realizados no ar, a 1 m da superfície, em triplicata e com um tempo total de aquisição de 900 segundos, considerando que nesse tempo foi obtida uma melhor estatística de contagem na aquisição dos dados pelo sistema de medições. Os pontos medidos foram mapeados via GPS para a construção da distribuição espacial das taxas de doses efetivas e das curvas de isodoses dos municípios estudados, utilizando-se respectivamente o software livre Quantum GIS e software livre Surfer.

A Tabela 4 mostra os pontos monitorados (1-28), as minas investigadas/materiais explorados, sendo estes identificadas pelos códigos de A até M. (A-D, minas de caulim; E-G, minas de granito; H-J, minas de feldspato; e L-M, minas de scheelita), os municípios onde se localizam as minas e as coordenadas geográficas.

Tabela 4 – Pontos monitorados, minas/material explorado, municípios e coordenadas dos campos de mineração investigados no Seridó.

Pontos	Mina/Material	Município	Coordenadas	
			S	WGr
1	A/Caulim	Equador-RN	06°56'39,8"	36°41'54,2"
2	A/Caulim	Equador-RN	06°56'39,4"	36°41'53,8"
3	A/Caulim	Equador-RN	06°56'38,9"	36°41'54,7"
4	B/Caulim	Equador-RN	06°56'40,3"	36°41'55,0"
5	B/Caulim	Equador-RN	06°56'40,2"	36°41'55,5"
6	B/Caulim	Equador-RN	06°56'42,3"	36°41'58,5"
7	B/Caulim	Equador-RN	06°56'42,9"	36°41'58,3"
8	C/Caulim	Junco do Seridó-PB	06°56'38,7"	36°41'52,0"
9	C/Caulim	Junco do Seridó-PB	06°59'58,3"	36°43'23,3"
10	C/Caulim	Junco do Seridó-PB	07°00'13,0"	36°43'22,0"
11	D/Caulim	Salgadinho-PB	07°03'23,4"	36°45'44,5"
12	D/Caulim	Salgadinho-PB	07°03'22,7"	36°45'46,1"
13	D/Caulim	Salgadinho-PB	07°03'21,5"	36°45'48,9"
14	E/Granito	Santa Luzia-PB	06°59'15,7"	36°50'54,1"
15	E/Granito	Santa Luzia-PB	06°59'24,2"	36°50'45,5"
16	E/Granito	Santa Luzia-PB	06°59'24,0"	36°50'45,8"
17	E/Granito	Santa Luzia-PB	06°59'23,8"	36°50'46,1"

continuação na próxima página

continuação da Tabela 4

18	E/Granito	Santa Luzia-PB	06°59'23,2"	36°50'46,6"
19	E/Granito	Santa Luzia-PB	06°59'21,6"	36°50'46,7"
20	F/Granito	Junco do Seridó-PB	06°59'23,9"	36°42'35,0"
21	G/Granito	São José do Sabugi-PB	06°48'20,9"	36°52'26,7"
22	G/Granito	São José do Sabugi-PB	06°48'20,9"	36°52'26,2"
23	H/Feldspato	Junco do Seridó-PB	06°59'32,6"	36°44'03,0"
24	I/Feldspato	Santana do Seridó-RN	06°44'03,0"	36°44'03,0"
25	J/Feldspato	São José do Sabugi-PB	06°48'31,1"	36°53'45,8"
26	J/Feldspato	São José do Sabugi-PB	06°48'27,3"	36°53'42,9"
27	L/Scheelita	Santa Luzia-PB	06°50'07,2"	36°52'16,6"
28	M/Scheelita	São José do Sabugi-PB	06°44'39,9"	36°50'34,8"

Fonte: próprio autor.

3.3 Tratamento Estatístico dos Dados

Os dados desta pesquisa foram tratados estatisticamente de forma descritiva. Foi aplicado o teste do tipo não-paramétrico, Shapiro-Wilk (SHAPIRO; FRANCA, 1972), na averiguação do grau de aderência entre a distribuição da amostra e a distribuição normal. Em seguida, devido ao quantitativo de pontos monitorados, foi utilizada a técnica Bootstrap, que se utiliza da ampliação dos dados através de sua reamostragem. Hesterberg *et al.* (2003) afirmam que os dados a serem reamostrados são denominados de amostra mestre, já sua ampliação, de pseudoamostras. O Bootstrap permite obter a distribuição amostral de um parâmetro a partir da amostra original, além de estimar parâmetros como a média, a variância, o máximo, mínimo, entre outros. Desta forma, a distribuição Bootstrap corresponde a uma tomada de decisão facilitada, testando assim, a normalidade da distribuição original.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 mostra os pontos monitorados (1 a 28), as minas investigadas (A a M)/os materiais explorados nas minas, os municípios onde se localizavam as minas e os valores obtidos na monitoração radiométrica para radiação gama “*in situ*” no ar, bem como os desvios padrão.

Tabela 5 - Taxas de doses efetivas dos campos de mineração de caulim, granito, feldspato e scheelita, localizados no Equador-RN, Junco do Seridó-PB, Salgadinho-PB, Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB e Santana do Seridó-RN.

Pontos	Mina/Minério	Município	$\dot{H}_E \pm DP$ (mSv/a)
1	A/Caulim	Equador-RN	1,54 ± 0,02
2	A/Caulim	Equador-RN	1,37 ± 0,02
3	A/Caulim	Equador-RN	1,50 ± 0,02
4	B/Caulim	Equador-RN	1,55 ± 0,02
5	B/Caulim	Equador-RN	1,49 ± 0,02
6	B/Caulim	Equador-RN	1,65 ± 0,02
7	B/Caulim	Equador-RN	1,54 ± 0,02
8	C/Caulim	Junco do Seridó-PB	2,29 ± 0,03
9	C/Caulim	Junco do Seridó-PB	1,64 ± 0,02
10	C/Caulim	Junco do Seridó-PB	2,01 ± 0,02
11	D/Caulim	Salgadinho-PB	1,78 ± 0,02
12	D/Caulim	Salgadinho-PB	1,73 ± 0,04
13	D/Caulim	Salgadinho-PB	2,94 ± 0,04
14	E/Granito	Santa Luzia-PB	8,60 ± 0,10
15	E/Granito	Santa Luzia-PB	6,07 ± 0,73
16	E/Granito	Santa Luzia-PB	7,46 ± 0,09
17	E/Granito	Santa Luzia-PB	11,60 ± 0,14
18	E/Granito	Santa Luzia-PB	4,76 ± 0,06
19	E/Granito	Santa Luzia-PB	3,52 ± 0,04
20	F/Granito	Junco do Seridó-PB	2,93 ± 0,04
21	G/Granito	São José do Sabugi-PB	3,08 ± 0,04
22	G/Granito	São José do Sabugi-PB	3,78 ± 0,04

continuação na próxima página

continuação da Tabela 5

23	H/Feldspato	Junco do Seridó-PB	2,26 ± 0,03
24	I/Feldspato	Santana do Seridó-RN	2,46 ± 0,03
25	J/Feldspato	São José do Sabugi-PB	5,42 ± 0,06
26	J/Feldspato	São José do Sabugi-PB	2,99 ± 0,04
27	L/Scheelita	Santa Luzia-PB	2,98 ± 0,04
28	M/Scheelita	São José do Sabugi-PB	2,57 ± 0,03

 \dot{H}_E : taxa de dose efetiva; DP: desvio padrão.

Fonte: próprio autor.

De acordo com a Tabela 6, considerando todos os resultados obtidos na monitoração das minas, as taxas de doses efetivas variaram de 1,37 a 11,60 mSv/a, com uma média e desvio padrão do conjunto de dados de $3,34 \pm 2,47$ mSv/a e um coeficiente de variação de 74%, expressando a heterogeneidade dos dados obtidos para o conjunto de minas investigadas.

Tabela 6 – Estatística descritiva das taxas de doses efetivas, medidas nos campos de mineração estudados.

PARÂMETROS	DESCRITIVA
Mínimo	1,37
Máximo	11,60
Média aritmética	3,34
Desvio padrão	2,47
Coeficiente de variação (%)	74
Moda	1,54
Primeiro quartil	1,64
Mediana	2,52
Terceiro quartil	3,65
N	28

 \dot{H}_E : taxa de dose efetiva (mSv/a)

Fonte: próprio autor.

A fim de identificar o comportamento estatístico descritivo dos campos de mineração a partir dos materiais explorados, foi gerada a Tabela 7, na qual se observa variações nos parâmetros mínimo, máximo e média aritmética, caracterizando heterogeneidade dos resultados obtidos quando comparados os valores das taxas de doses efetivas nos campos de mineração investigados, a partir do material extraído.

Tabela 7 – Estatística descritiva das taxas de doses efetivas, medidas nos campos de mineração estudados, por tipo de material explotado.

PARÂMETROS	Descritiva			
	CAULIM	GRANITO	FELDSPATO	SCHEELITA
Mínimo	1,37	2,93	2,26	2,57
Máximo	2,94	11,6	5,42	2,98
Média aritmética	1,78	5,80	3,28	2,80
Desvio padrão	0,43	2,96	1,46	0,29
Coefficiente de variação (%)	24	52	44	10
Moda	1,54	--	--	--
Primeiro quartil	1,54	3,52	2,36	2,57
Mediana	1,64	4,76	2,73	2,78
Terceiro quartil	1,78	7,46	4,20	2,98
N	13	9	4	2

\dot{H}_E : taxa de dose efetiva (mSv/a)

Fonte: próprio autor.

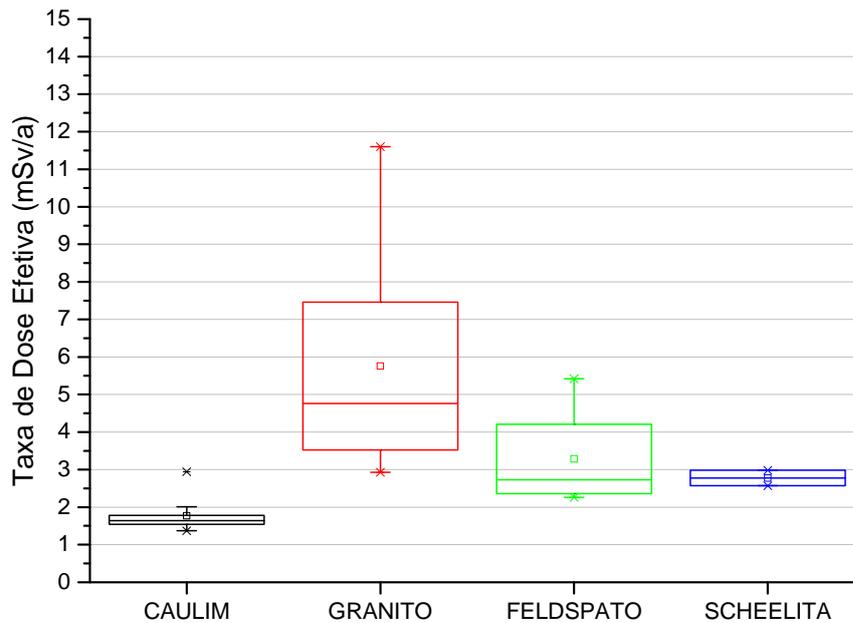
Como a radiação natural é normalmente recebida por um período prolongado de tempo, a uma taxa relativamente constante (ALVES *et al.*, 2013), além de mobilizar-se no ambiente através da atmosfera e rochas, entre outros (UNSCEAR, 2000; BALOCH *et al.*, 2012), considerou-se avaliar a exposição dos trabalhadores dos campos de mineração da região do Seridó, a partir da exposição natural total, que tem como valor de referência para taxa de dose efetiva 2,40 mSv/a (UNSCEAR, 2000), prevendo um cenário com ponderação total. Assim, a partir dos valores mínimos apresentados na Tabela 7, os campos de mineração de granito e scheelita possuem valores de taxas de doses efetivas ambientais, acima da referência mundial para fontes naturais de radiação. Contudo, em relação a média aritmética, a mina de feldspato, também encontra-se com valor acima da referência.

As taxas de doses efetivas das minas de granito variaram de 2,93 a 11,60 mSv/a, com média aritmética de $5,80 \pm 2,96$ mSv/a e coeficiente de variação de 52%. Já nas minas de scheelita, as taxas de doses efetivas variaram de 2,57 a 2,98 mSv/a, com média aritmética de $2,80 \pm 0,29$ mSv/a e coeficiente de variação de 10%. Nas minas de feldspato por sua vez, houve variação nas taxas de doses efetivas de 2,26 a 5,42 mSv/a, com média de $3,28 \pm 1,46$ mSv/a e coeficiente de variação de 44%, assumindo-se um nível de confiança de 95% em todos os casos.

Contudo, considerando os valores máximos obtidos na Tabela 7, constata-se que os campos de mineração dos quatro materiais explotados possuem valores acima da referência mundial. Por sua vez, ao considerar a média aritmética, apenas as minas de caulim, possuem valor médio de taxa de dose efetiva anual abaixo da referência mundial.

A fim de certificar a influência da relação do teste das médias e a amplitude relacionada para os diferentes materiais explotados, foi gerada a Figura 17 para verificação da tendência a normalidade na distribuição dos dados investigados.

Figura 17- Diagramas de box plot para diferentes materiais explotados nos campos de mineração.

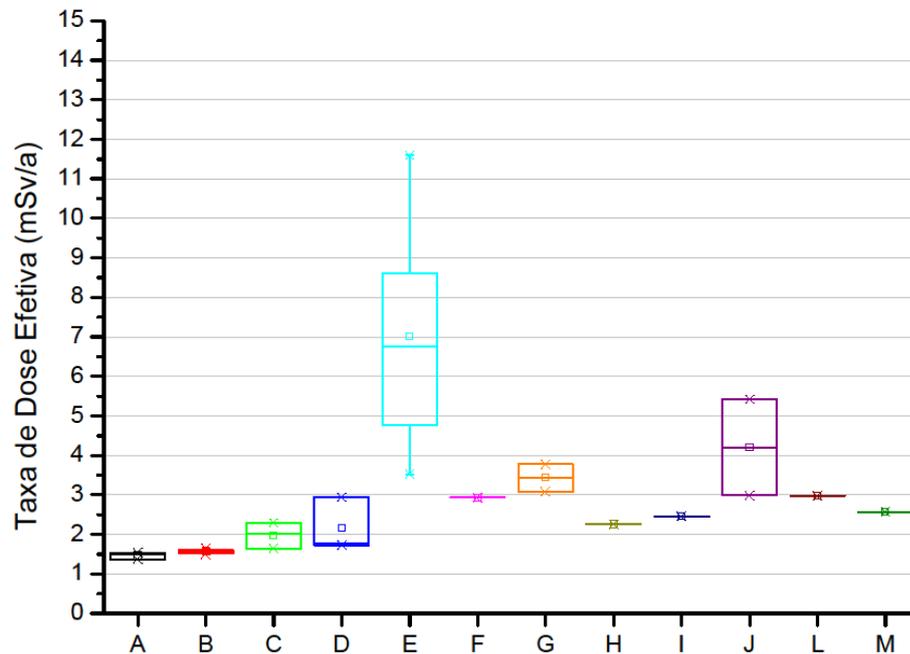


Fonte: próprio autor.

Os diagramas de caixas na Figura 17 revelam diferenças significativas entre o caulim, granito, feldspato e scheelita, para o teste da média aritmética e mediana, com dispersões evidenciadas para as minas de granito e feldspato e quase nenhuma sendo evidenciada para as minas de caulim e scheelita. A fim de investigar em quais minas evidenciam-se as maiores dispersões, foram gerados box plots para cada mina investigada.

Observa-se na Figura 18 mostra o comportamento, em termos de dispersão, baseando-se na descritiva das médias e amplitudes, relacionando os diagramas por mina, identificadas pelos códigos de A até M. O que possibilitou a visualização dos maiores e menores valores, a amplitude e tendência a uma distribuição normal dos dados.

Figura 18 - Diagrama de box plot da taxa de dose efetiva observada em diferentes campos de mineração de caulim, granito, feldspato e scheelita, na região do Seridó.



(A-D, minas de caulim; E-G, minas de granito; H-J, minas de feldspato; e L-M, minas de scheelita).

Fonte: próprio autor.

Os valores apresentados na Figura 18 foram reportados em termos de taxas de doses efetivas baseando-se nas médias aritméticas, medianas, desvios associados e valores extremos (*outlets*), mostrando níveis diferenciados de dispersões para as minas C, D, E, G e J, principalmente E e J, não sendo intensificados para os resultados obtidos nas demais minas, principalmente pelas condições limitadas da coleta de dados.

Desta forma, comparando as Figuras 17 e 18, a primeira evidencia que as médias obtidas são diferentes entre os materiais explorados, já a segunda, evidencia que as médias obtidas são diferentes entre os campos de mineração, independente do material explorado, permitindo avaliar diferentes exposições radiológicas para os trabalhadores dos campos de mineração investigados. Esta condição favorece uma possível comparação da radiometria desses ambientes com os estudos já realizados na jazida de urânio de Espinharas-PB e em outras regiões adjacentes, cujos resultados conduzem a correlação com o tipo de rocha da região.

Considerando que o caulim é derivado de rochas sedimentares e assumindo que as rochas ígneas, a exemplo do granito, normalmente apresentam níveis maiores de minerais radioativos quando comparadas com às sedimentares (SANTOS JÚNIOR, 2009), justifica-se que o caulim não tende a possuir níveis elevados dos minerais radioativos. Contudo, pode

apresentar subprodutos associados em até 50% de seu volume, como o quartzo, a mica e o feldspato, além de areia (MME, 2009), que podem elevar os valores de taxas de doses em uma monitoração radiométrica ambiental.

Já o granito, por ser constituído basicamente por minerais de quartzo, pode apresentar grandes quantidades de radionuclídeos primordiais como ^{238}U , ^{232}Th e seus descendentes, assim como o ^{40}K (AMARAL, 1987; 1994). Por sua vez, o feldspato, amplamente distribuído em rochas ígneas (SAMPAIO, 2008), juntamente com a scheelita, encontrada nos pegmatitos graníticos (GERAB, 2014), também podem dispor de maiores concentrações desses radionuclídeos, aumentando os níveis de radiação nesse tipo de material, a exemplo do que foi observado no referido estudo.

Observou-se também que as minas que exploram um mesmo material apresentaram resultados diferenciados (Figura 18), evidenciando em alguns locais níveis mais altos de radioatividade ambiental. Neste sentido, destacamos as minas de caulim de Salgadinho-PB (2,94 mSv/a) e Equador-RN (1,65 mSv/a); granito em Santa Luzia-PB (11,60 mSv/a), São José do Sabugi-PB (3,78 mSv/a) e Junco do Seridó-PB (2,93 mSv/a); feldspato, em São José do Sabugi-PB (5,42 mSv/a), Santana do Seridó-RN (2,46 mSv/a) e Junco do Seridó-RN (2,26 mSv/a); e as minas de scheelita em Santa Luzia-PB (2,98 mSv/a) e São José do Sabugi-PB (2,57 mSv/a). Provavelmente, pela dependência do seu posicionamento geográfico e/ou do veio rochoso da região de estudo, mas que também pode relacionar-se à jazida de São José de Espinharas-PB.

Tendo em vista a comparação dos resultados obtidos neste estudo, com as taxas de doses encontradas no depósito de urânio de Espinharas-PB, que apresentou valores variando de 3,79 a 93,80 mSv/a, com média de 19,47 mSv/a (SILVA, 2014) e ainda o valor médio de 10,83 mSv/a, encontrado na zona rural de São José de Espinharas-PB (SILVA, 2014), vale destacar que a média de taxa de dose encontrada na mina de granito de Santa Luzia-PB (E), de 7,00 mSv/a (Figura 18), inclui a mina E como área de elevado BG natural, em nível médio, assim como o depósito de urânio e a zona rural de São José de Espinharas-PB. Este fato impele estudos posteriores de caracterização dos minerais das rochas e radionuclídeos presentes nessas áreas, em vista das diferentes formações geológicas da região, podendo assim, proporcionar a determinação mais concreta de um perfil radiométrico dessas minas em função do tipo de material explorado, assim como o detalhamento dos Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM) e possível identificação dos Materiais Radioativos de Ocorrência Natural Tecnologicamente Modificados (TENORM), que caracterizam exploração desordenada dos recursos naturais e promovem riscos ao meio ambiente e a população local.

Para testar o tipo de distribuição associada aos dados coletados no referido estudo, foi utilizado o teste estatístico de Shapiro-Wilk, onde foram consideradas as seguintes hipóteses: a) nula, para aceitar amostras com distribuição normal; b) alternativa, para rejeitar uma distribuição normal, ou seja, dispersões que caracterizam heterogeneidade na distribuição.

Os resultados do teste de Shapiro-Wilk foram apresentados na Tabela 8, onde pode ser observado que não confirmam a aderência a uma distribuição normal das proporções estimadas nas doze minas investigadas (A-M), com p-valor de 1,58E-05. Esta mesma tendência a uma distribuição não normal foi evidenciada quando aplicado o teste às minas de Caulim em conjunto, com p-valor de 0,00283.

Por sua vez, constata-se uma tendência à normalidade nas minas de Granito e Feldspato. Contudo, as minas de Scheelita, em decorrência da insuficiência dos dados, não foram avaliadas quanto à tendência de distribuição normal pelo teste aludido.

Tabela 8 - Teste de Shapiro-Wilk para todas as minas estudadas em conjunto e para os materiais explorados nas minas.

SHAPIRO-WILK	MINAS DE A-M	CAULIM (A-D)	GRANITO (E-G)	FELDSPATO (H-J)	SCHEELITA (L-M)
Estatística	0,75002	0,76685	0,88621	0,80095	--
p-valor	1,58E-05	0,00283	0,18235	0,10393	--
Decisão a nível (5%)	RN	RN	AN	AN	a*

Valores em mSv/a

RN: Rejeitar normalidade; AN: Aceitar normalidade

a* Dados insuficientes para o teste de normalidade Shapiro-Wilk

Fonte: próprio autor.

Assim, o teste de Shapiro-Wilk foi reaplicado, desta vez para as minas individualmente, a fim de rejeitar ou aceitar a normalidade das proporções estimadas. Desta forma, o resultado corroborou que nas minas A, B, C, D (caulim) e E (granito), foram aceitas como distribuição normal, com p-valores de 0,43; 0,56; 0,85; 0,07 e 0,93, respectivamente. Contudo, os dados foram insuficientes para aplicar o teste nas minas F, G, H, I, J, L e M individualmente (Tabela 9).

Tabela 9 - Teste de Shapiro-Wilk para cada mina estudada.

SHAPIRO-WILK	A	B	C	D	E
Estatística	0,91	0,92	0,99	0,78	0,97
p-valor	0,43	0,56	0,85	0,07	0,93
Decisão a nível (5%)	AN	AN	AN	AN	AN

Valores em mSv/a

AN: Aceitar normalidade

Fonte: próprio autor.

Assim, para as minas de A até E, a média aritmética poderá ser utilizada, tendo em vista a aceitação da normalidade através do teste supracitado. Contudo, considerando a limitação dos dados coletados justificada anteriormente e com o propósito de maximizar a distribuição dos dados nos campos de mineração, utilizou-se o método de reamostragem Bootstrap. Este permitiu modelar o estudo a partir de reamostragens com formulação de pseudoamostras, necessárias para inferir uma melhor estimativa para o comportamento radioecológico dos campos de mineração investigados a partir dos materiais explorados. A reamostragem objetiva tornar os dados mais representativos, além de representar uma alternativa para minimizar os problemas de erros estatísticos, principalmente na utilização da média aritmética como medida de tendência para o conjunto de dados.

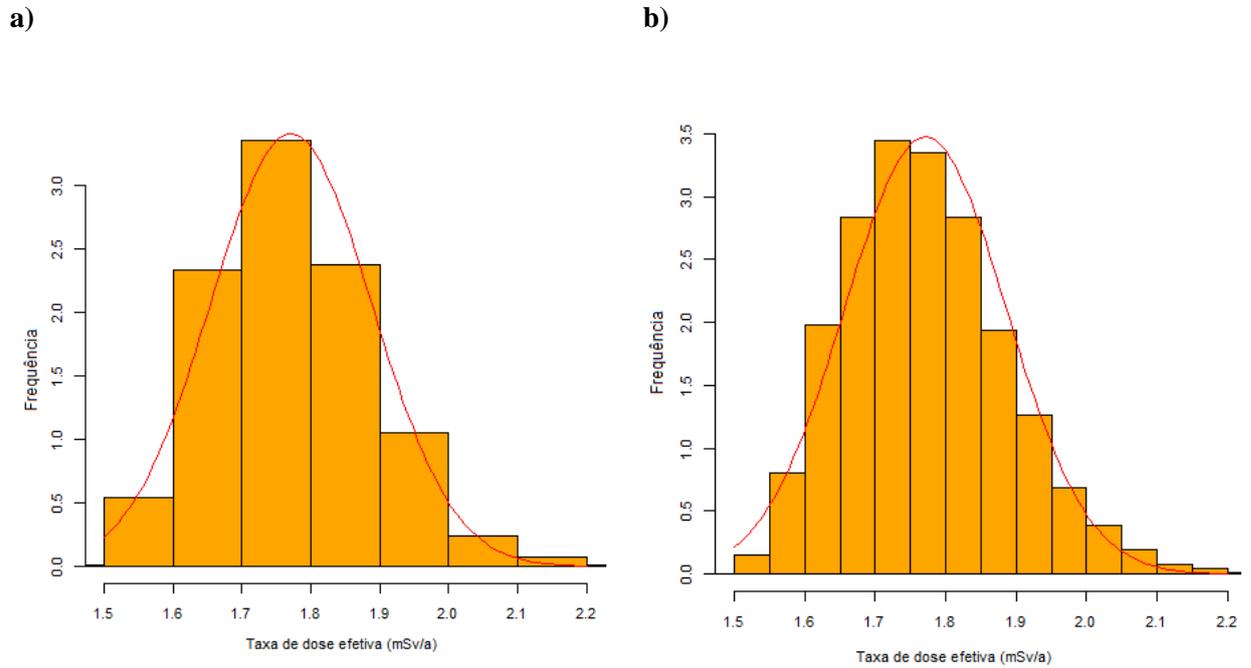
A modelagem foi baseada nos resultados brutos, vinte e oito taxas de doses efetivas, simulando para repetições de 1.000 e 10.000, com intervalo de confiança de 95%. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 19, 20, 21 e 22 em forma de histogramas.

Conforme observado pelos histogramas detalhados, com dados relativos à modelagem, verifica-se que para todas as situações, há uma tendência para distribuição normal, o que aumenta a confiança do uso da média aritmética na avaliação comparativa, utilizada na estatística descritiva deste estudo.

Desta forma, a modelagem através do Bootstrap permitiu certificar a utilização da média aritmética como medida de referência para a radiometria dos campos de mineração estudados.

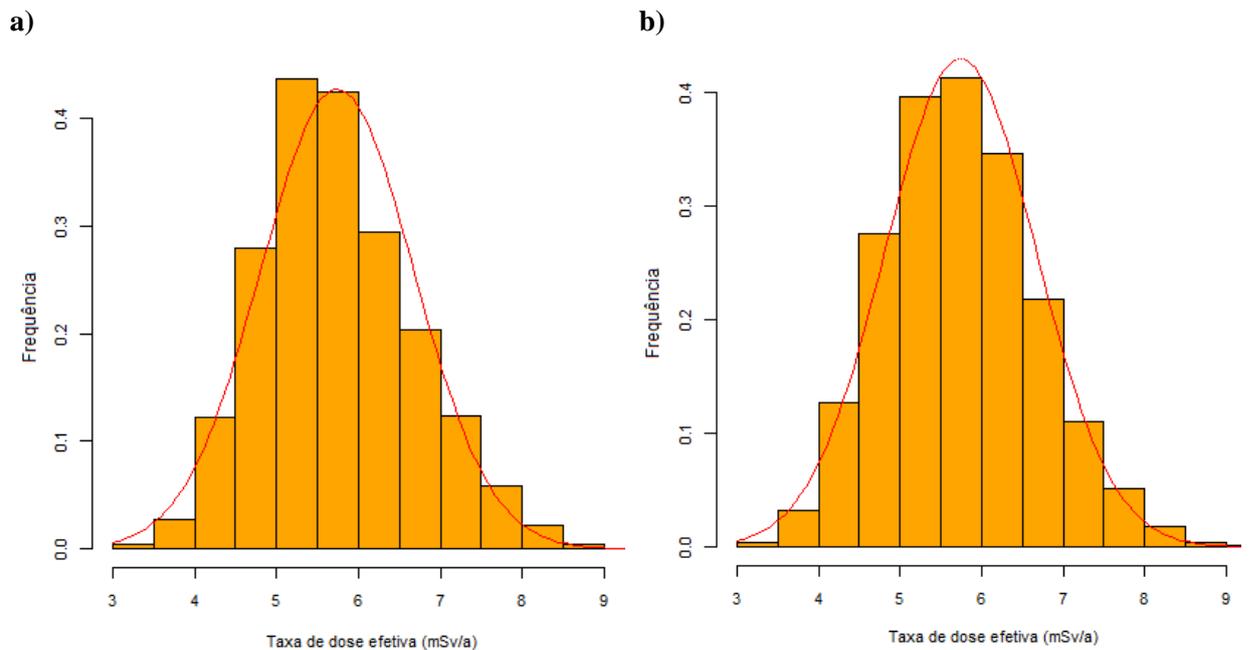
A Figura 23 representa a distribuição espacial das taxas de doses para visualização do perfil radiométrico dos campos de mineração investigados neste estudo. Para tal, foram utilizados os valores das taxas de doses efetivas medidas no ar e suas respectivas coordenadas geográficas. A classificação das taxas de doses efetivas se deu através de escala de cores.

Figura 19 – Histogramas de 1.000 (a) e 10.000 (b) reamostragens das taxas de doses efetivas das minas de caulim.



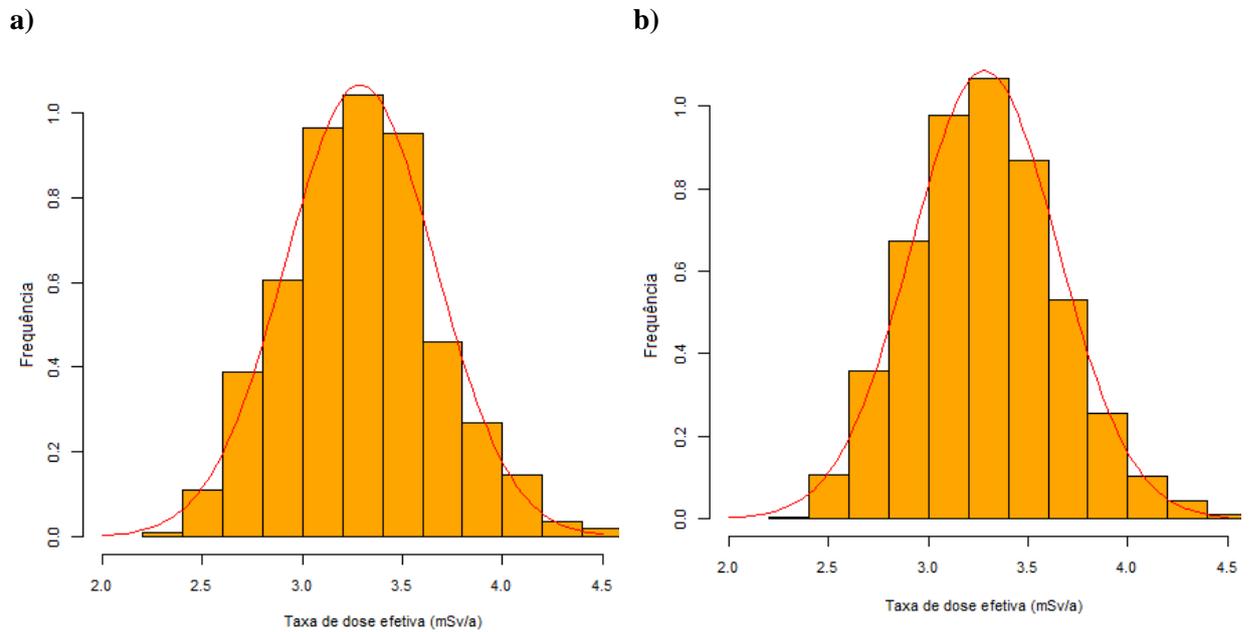
Fonte: próprio autor.

Figura 20 – Histogramas de 1.000 (a) e 10.000 (b) reamostragens das taxas de doses efetivas das minas de granito.



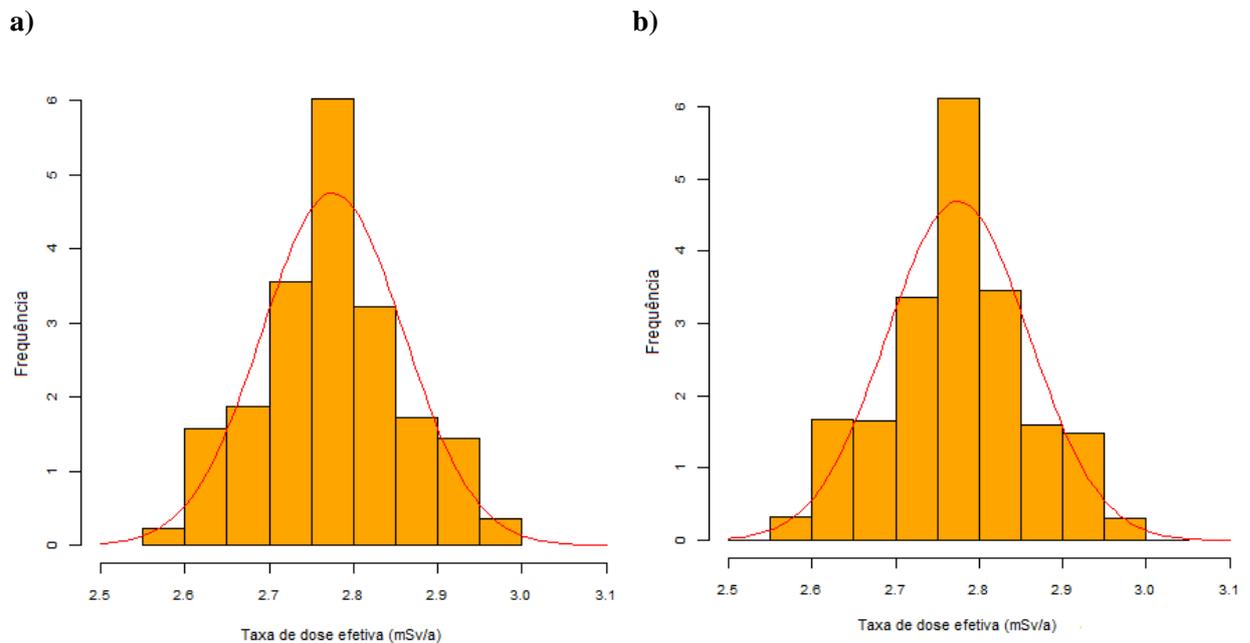
Fonte: próprio autor.

Figura 21 – Histogramas de 1.000 (a) e 10.000 (b) reamostragens de taxas de doses efetivas das minas de feldspato.



Fonte: próprio autor.

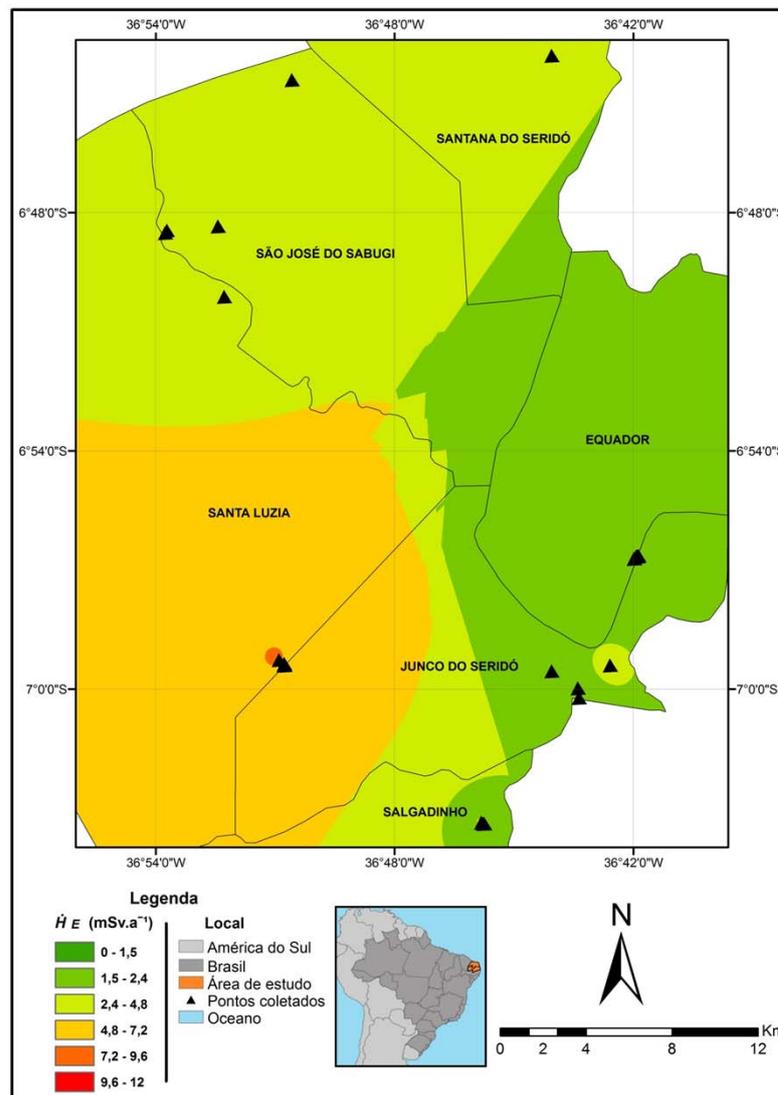
Figura 22 – Histogramas de 1.000 (a) e 10.000 (b) reamostragens de taxas de doses efetivas das minas de scheelita.



Fonte: próprio autor.

A distribuição espacial das taxas de doses da Figura 23 confirma o que foi descrito anteriormente, onde as maiores taxas de doses efetivas foram identificadas nas minas localizadas nos municípios de Santa Luzia-PB e as menores, nas minas localizadas em Equador-RN.

Figura 23 – Distribuição espacial das taxas de doses efetivas dos campos de mineração, nos municípios de Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB, Salgadinho-PB, Junco do Seridó-PB, Equador-RN e Santana do Seridó-RN.

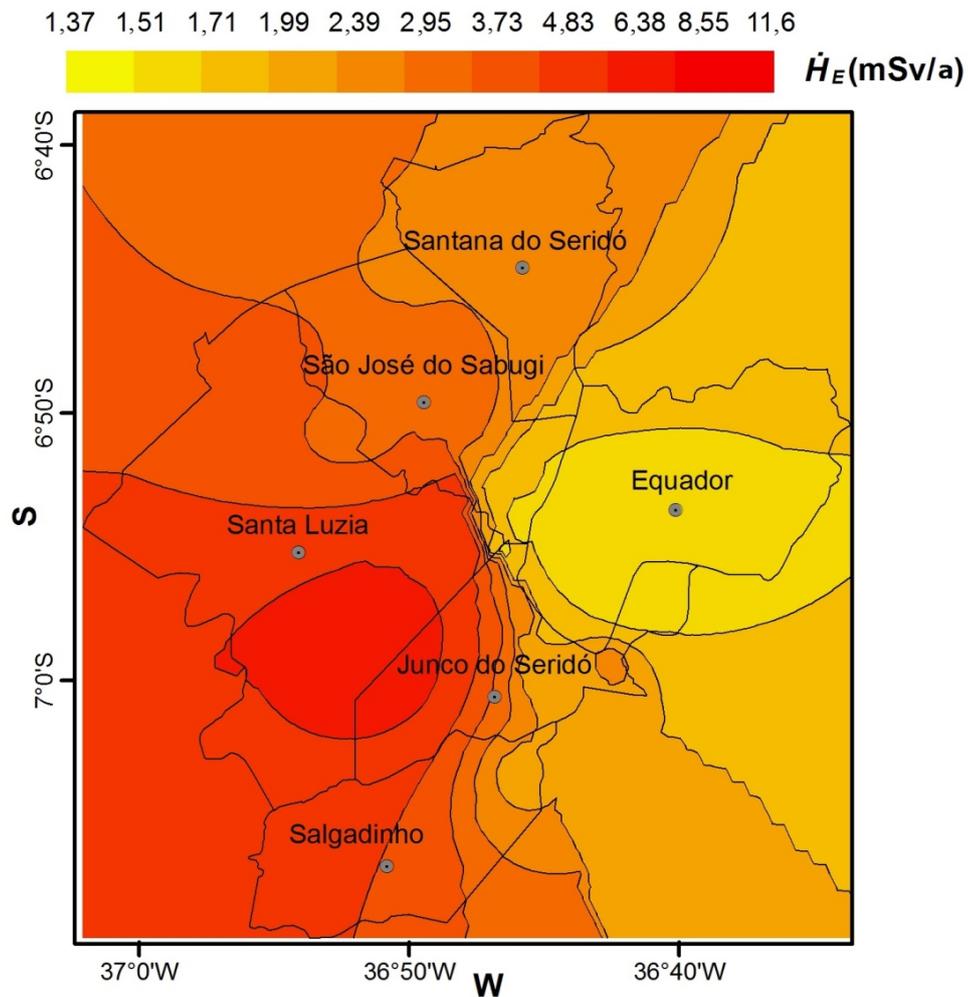


Fonte: próprio autor.

Devido algumas sobreposição de pontos monitorados no mapa anterior, foi gerado o mapa de curvas, apresentado na Figura 24, de forma a obter uma melhor visualização da área

com valores de taxas de doses mais elevadas, destacando-se os municípios de Santa Luzia-PB e Junco do Seridó-PB.

Figura 24 - Curvas de isodoses dos municípios de Equador-RN, Junco do Seridó-PB, Salgadinho-PB, Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB, Santana do Seridó-RN.



Fonte: próprio autor.

As curvas geradas na Figura 24 mostram valores máximos partindo do município de Santa Luzia-PB em direção a Equador-RN, destacando valores mais altos na porção central das regiões Leste a Oeste de Santa Luzia-PB, bem como a oeste de Junco do Seridó-PB. Consta-se também que as minas de caulim localizadas nos municípios de Salgadinho-PB, Junco do Seridó-PB e Equador-RN, possuem valores de taxas de doses efetivas diferenciados, o que pode relacionar-se não ao caulim, mas as rochas hospedeiras do mineral principal. Assim, as minas investigadas neste estudo, por apresentarem resultados superiores a média

mundial estabelecida pela UNSCEAR, em geral, sofrem influência dos NORMs UNSCEAR (2008).

Através da Tabela 10, observam-se os resultados obtidos no presente estudo, em relação as médias das taxas de doses efetivas constatadas em outros municípios da Paraíba e alguns estudos realizados mundialmente.

Tabela 10 - Comparação dos valores médios das taxas de doses efetivas ambientais do BG natural deste estudo, com outros da literatura.

\dot{H}_E (mSv/a)	Localização	Referência
3,34	Junco do Seridó-PB, Salgadinho-PB, Santa Luzia-PB, São José do Sabugi-PB, Equador-RN e Santana do Seridó-RN, Brasil	Este estudo
6,43	Santa Luzia-PB, Brasil	Este estudo
3,57	São José do Sabugi-PB, Brasil	Este estudo
2,46	Santana do Seridó-RN, Brasil	Este estudo
2,23	Junco do Seridó-PB, Brasil	Este estudo
2,15	Salgadinho-PB, Brasil	Este estudo
1,52	Equador-RN, Brasil	Este estudo
10,83	São José de Espinharas-PB, Brasil	(Silva, 2014)
2,97	Patos, São Mamede, Santa Luzia e São José do Sabugi, Brasil	(Silva, 2014)
2,53	Abreu e Lima, Brasil	(Morais, 2013)
2,81	Igarassu, Brasil	(Morais, 2013)
2,59	Paulista, Brasil	(Morais, 2013)
2,32	Olinda, Brasil	(Morais, 2013)
7,00	Guarapari, Brasil	(Hendry <i>et. al.</i> , 2009)
6,40	Guangdong, China	(Hendry <i>et. al.</i> , 2009)
6,00	Ramsar, Iran	(Hendry <i>et. al.</i> , 2009)

Fonte: próprio autor.

Pode-se inferir através da Tabela 10, que a média da taxa de dose efetiva encontrada nas minas de granito e scheelita no município de Santa Luzia-PB (6,43 mSv/a), tem valor

semelhante aquele encontrado em Guangdong-China, 6,40 mSv/a. Porém, se considerarmos apenas a mina de granito de Santa Luzia-PB, a média de taxa de dose efetiva passaria a ser de 7,00 mSv/a (Figura 18, mina E). Contudo, esta mina apresentou um valor de 11,60 mSv/a (Ponto 17, Tabela 5), que segundo a norma CNEN 3.01/007 (2005), demanda uma avaliação para a implementação de medidas de proteção ou de remediação, uma vez que uma dose anual de 10 mSv anual é usada como um valor genérico de referência para uma ação de intervenção em situações de exposição crônica.

Por sua vez, São José de Espinharas-PB, possui uma média de taxa de dose efetiva oriunda do BG natural ainda maior (10,83 mSv/a) do que outras regiões tais como Guarapari-ES (7,00 mSv/a); Guangdong-China (6,40 mSv/a) e Ramsar-Iran (6,00 mSv/a). Sendo todas estas áreas classificadas como níveis médios, para áreas referenciadas como sendo de alto BG natural, bem como a jazida de Espinharas (19,47 mSv/a) (SILVA, 2014).

Considerando o estudo de Silva (2014), que envolveu os municípios de Patos, São Mamede, Santa Luzia e São José do Sabugi, todos na Paraíba (2,97 mSv/a), constata-se que, quando comparado ao conjunto de municípios envolvidos neste estudo (3,34 mSv/a), ambos os conjuntos de municípios investigados, são considerados como área de alto BG natural, porém em nível baixo considerando a classificação do ENRA.

Portanto constata-se que, em sua maioria, quanto mais próximo da jazida de urânio de São José de Espinharas-PB, maiores são os valores das taxas de doses efetivas (Tabela 10). Neste sentido, apesar das doses serem medidas no ar, os resultados obtidos apontam a necessidade de se considerar os riscos radioativos para a saúde dos trabalhadores e a população em geral que residem nas áreas próximas ao campo de mineração de Santa Luzia-PB, em destaque, uma vez que os radionuclídeos podem contaminar aquíferos, córregos e terras agricultáveis (DLAMINI *et al.*, 2016). Desta forma, uma caracterização radiométrica das rochas e minerais associados consubstanciarão os valores medidos no ar, seguido de um estudo epidemiológico, a fim de traçar possíveis correlações do processo saúde-doença entre os mineradores.

Tendo em vista que as maiores fontes de exposição à radiação são àquelas provenientes da radiação cósmica e terrestre (FAANU *et al.*, 2016) e que a exposição dos trabalhadores dos campos de mineração à radiação depende dentre outros fatores, do tipo de mina, da geologia local e das condições de trabalho, e ainda considerando que nesta avaliação todas as minas eram a céu aberto, foi utilizado o valor de referência de 0,46 mSv/a (UNSCEAR, 2000), numa abordagem que trate da exposição dos trabalhadores à radiação,

excluindo-se as fontes *indoor* (inalação de radônio e seus descendentes e exposição externa) e ingestão.

Assim, na Tabela 11, foi utilizado o fator de ocupação estabelecido pela UNSCEAR (2000) de 0,2 para tempo de exposição de 4,8 horas diárias, que correspondem a 1.753 h/a; em seguida foi utilizado o fator de ocupação de 0,23 baseada na Consolidação das Leis de Trabalho, Decreto de Lei nº 5.452/43, que estabelece uma jornada de trabalho para os mineradores tanto de minas a “céu aberto” quanto em minas subterrâneas, de 6 horas diárias, que corresponde a 2.016 h/a (CLT, 1943). E finalmente, o fator 0,3 para o tempo de exposição de 8 horas diárias, o que normalmente acontece nesta atividade, correspondendo a 2.630 h/a, também referido na CLT, em casos de necessidade da mineradora. Este último fator, é o mais representativo para a realidade local da zona rural da região do Seridó segundo Silva (2014).

Tabela 11 - Taxas de doses efetivas para diferentes fatores de ocupação (FO) *outdoor*.

Ponto	Mina	FO 0,2	FO 0,23	FO 0,3
		$\dot{H}_e(\text{mSv.a}^{-1})$	$\dot{H}_e(\text{mSv.a}^{-1})$	$\dot{H}_e(\text{mSv.a}^{-1})$
1	A	0,31	0,35	0,46
2	A	0,27	0,32	0,41
3	A	0,30	0,35	0,45
4	B	0,31	0,36	0,47
5	B	0,30	0,34	0,45
6	B	0,33	0,38	0,50
7	B	0,31	0,35	0,46
8	C	0,46	0,53	0,69
9	C	0,33	0,38	0,49
10	C	0,40	0,46	0,60
11	D	0,36	0,41	0,53
12	D	0,35	0,40	0,52
13	D	0,59	0,68	0,88
14	E	1,72	1,98	2,58
15	E	1,21	1,40	1,82
16	E	1,49	1,72	2,24
17	E	2,32	2,67	3,48
18	E	0,95	1,09	1,43
19	E	0,70	0,81	1,06
20	F	0,59	0,67	0,88
21	G	0,62	0,71	0,92
22	G	0,76	0,87	1,13

continuação na próxima página

continuação da Tabela 11

23	H	0,45	0,52	0,68
24	I	0,49	0,57	0,74
25	J	1,08	1,25	1,63
27	L	0,60	0,69	0,89
28	M	0,51	0,59	0,77

Fonte: próprio autor.

Utilizando-se o fator de ocupação 0,2 tem-se que as minas D (caulim), E , F e G (granito), I e J (feldspato) e L e M (scheelita), possuem valores de taxas de doses efetivas acima da referência mundial. Quando utilizado o fator de ocupação 0,23 há um aumento de minas com valores de taxas de doses efetivas ambientais acima da referência mundial, a saber, as minas C (caulim) e H (feldspato). Por sua vez, se utilizado o fator de ocupação 0,3 que corresponde a realidade dos mineradores do Seridó, todas as minas deste estudo, à exceção da mina A (caulim), possui valores de taxas de doses acima da referência mundial.

Assim, quando utilizados os fatores de ocupação externos 0,2; 0,23; e 0,3 que correlacionam a exposição dos mineradores ao tempo de trabalho, todos eles, exceto aqueles da mina A (caulim), estão expostos a níveis diferenciados de radiação. Este fato impele a necessidade da caracterização radiométrica das rochas e minerais relacionados às minas com valores elevados, destacando a mina E (granito), com valores acima em cerca de 8 vezes a referência mundial. Convém mencionar que para uma avaliação da exposição ocupacional dos mineradores, há a necessidade da dosimetria individual.

Por outro lado, vale salientar que todas as medições realizadas nas minas de caulim foram de superfície, devido à precariedade da abertura das minas subterrâneas e consequente risco de desmoronamento. Desta forma, não foram avaliadas as exposições dos trabalhadores “*indoor*”, dentro das minas subterrâneas de caulim, conhecidos como “homens topeira” (Figura 25).

Figura 25 - Abertura para lavra do caulim subterrâneo no município de Equador-RN.



Fonte: próprio autor.

Contudo, mesmo não sendo avaliadas as exposições *indoor*, se faz necessário destacar os rejeitos de caulim dispersos aleatoriamente no meio ambiente e que podem ser fontes potenciais de impacto ambiental para cenários presentes e futuros (Figura 26), com destaque para a mina D em Salgadinho-PB que apresentou valor acima da referência mundial, neste caso $2,94 \text{ mSv/a}^{-1}$, quando utilizado o fator de ocupação total, tendo em vista que os subprodutos como o quartzo, a mica e o feldspato estão associados em até 50% de seu volume (MME, 2009). Vale salientar que uma concentração anômala de urânio já foi encontrada em um depósito de caulim na Silésia, Polônia (CHAU, *et al.*, 1999). Este fato poderá direcionar estudos de concentração de radionuclídeos nas minas de caulim na região estudada.

Seguindo as normas regulamentadoras que tratam da segurança e saúde ocupacional na mineração (NR 22, 1999), compete à empresa mineradora interromper todo e qualquer tipo de atividade que exponha os trabalhadores a condições de risco grave para sua saúde e segurança. Cabe à mineradora também, elaborar e implementar o Programa de Gerenciamento de Riscos – PGR, que inclui os riscos físicos, químicos e biológicos; tratar da ventilação; proteção respiratória; riscos decorrentes do trabalho em altura, profundidade e espaços confinados.

Por sua vez, o controle da exposição ambiental através de fontes naturais de radiação impõe um desafio para órgãos reguladores e de monitoramento ambiental.

Figura 26 - Dispersão aleatória dos rejeitos de caulim.



Fonte: próprio autor.

Por fim, convém citar que os valores de doses medidos no ar, não devem ser considerados quanto a estimativas de riscos determinísticos em relação a exposições diretas. Além deste fato, valores estabelecidos por órgãos regulamentadores apenas representam uma média global, não traçam por si só, o limiar para intervenções subsequentes, contribuindo para uma estimativa de possíveis riscos estocásticos associados aos valores obtidos nos campos de mineração.

Contudo, em casos de situações crônicas de exposições radioecológicas, aos quais podem estar associados efeitos estocásticos, traçar correlações entre as taxas de doses efetivas ambientais para processos de tomada de decisão específicos, requer estudos detalhados de caracterização radiométrica das amostras das rochas e minerais relacionados, além de estudos epidemiológicos de coorte, caso-controle e correlação geográfica que tratem dos padrões, causas e quantificação dos valores obtidos na dosimetria ambiental.

Assim, as medições de referência deste estudo podem ser utilizadas para estimar as taxas de doses locais, contribuindo para o banco de dados nacional e servindo de base para a criação e aplicação de modelos matemáticos que definam as vias de transferência dos radionuclídeos naturais nessa região, favorecendo a identificação de possíveis riscos associados ao meio ambiente e a população, além de contribuir para um melhor entendimento dos efeitos decorrentes da radioatividade natural e sua correlação com os aspectos ambientais e sociais.

5. CONCLUSÃO

Utilizando-se o fator de ocupação total, os campos de mineração D (caulim), E , F e G (granito), I e J (feldspato) e L e M (scheelita), possuem valores de taxas de doses efetivas acima da referência mundial.

Com a avaliação da monitoração dos campos de mineração, não é possível estimar o risco determinístico associado aos trabalhadores dos campos de mineração investigados, mas poderá contribuir como ponto de partida para futuras investigações dos riscos estocásticos associados.

O estudo realizado contribuiu para aumentar o banco de dados dosimétricos da região do Seridó e poderá auxiliar, não somente no valor de referência brasileiro, mas também mundial.

REFERÊNCIAS

- ABUSINI, M. **Determination of Uranium, Thorium and Potassium Activity Concentrations in Soil Cores in Arabia valley, Jordan.** Radiation Protection Dosimetry, v. 128, p. 213-216, 2007.
- ALVES, V. A.; ROCHEDO, E. R. R.; FERREIRA, N. M. P. D. **Public exposure in commercial national flights to and from Rio de Janeiro, Brazil.** IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety – IRPA. RJ, Brazil, April 15-19, 2013.
- AFSHARI, N. S.; ABBASISAR, F.; ABDOLMALEKI, P.; NEJAD, M. G. **Determination of ^{40}K concentration in milk samples in Tehran, Iran and estimation of its annual effective dose.** Iran J. Radiat. Res., v. 3, p. 159-164, 2009.
- ALI, M.; QURESHI, A. A.; WAHEED, A.; BALOCH, M.A.; QAYYUM, H.; TUFAIL, M. **Assessment of radiological hazard of NORM in Margalla Hills Limestone, Pakistan.** Environ. Monit. Assess. v. 184 p. 4623-34, 2011.
- AMARAL, R. S. **Determinação de urânio na fosforita por meio de medidas radiométricas e análise por ativação.** Recife: Ed. UFPE, 1987, 109 p.
- AMARAL, R. S. **Dose na população da região urano-fosfática pernambucana, devida à presença de urânio e ^{226}Ra nos cultivares.** São Paulo: Ed. IPEN/CNEN/USP, 1994, 156 p.
- ANJOS, R. M.; VEIGA, R.; SOARES, T.; SANTOS, A. N. A.; AGUIAR, J. G.; FRASCA, M. H. B. O.; BRAGE, J. A. P.; UZÊDA, D.; MANGIAL, L.; FACURE, A.; MOSQUERA, B.; CARVALHO, C.; GOMES, P. R. S. **Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites.** Radiation Measurements. v. 39, p. 245-253, 2005.
- BALOCH, M. A.; QUESHI, A. A.; WAHEED, A.; ALI, M.; ALI, N.; TUFAIL, M.; BATOOL, S.; AKRAM, M.; IFTIKHAR, O.; QAVYYUM, H.; MANZOOR, S.; KHAN, H. A. **A Study on Natural Radioactivity in Khewra Salt Mines, Pakistan.** J Radiat Res, v. 53, p. 411-421, 2012.
- BENTES, M., MERMELO & OHOFUJI. **Projeto Serra da Mesa II;** Relatório Final. DNPM-CPRM, Goiânia, 1977, 62 p.
- BEZERRA JÚNIOR, J. G. O. S.; NUBELIA, M. **Caracterização geoambiental da microrregião do Seridó oriental do Rio Grande do Norte.** Holos, ano 23, v. 2, 2007.
- BODANSHY, D.; ROBBIN, M. A.; STUDLER, D. **Indoor radon and its hazards,** University of Washington Press: London, 1987.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedade dos solos - Manual de Morfologia e Classificação dos Solos.** Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 7. ed, 1989.
- BURNETT, W.C.; HULL, CD. **Environmental radioactivity of phosphogypsum.** Paper presented at Sympo. Techno!. Enhance. Around Non-Nucl. Ind. Khon Kaen, Thailand, January 1995.

CALEGARO, J. U. M. **Baixos níveis de radiação ionizante causam câncer?** Radiol Bras, v. 40, n. 4, pp. IX-X, 2007.

CANO, T. M. **Sumário Mineral 2012**, DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2012.

CAVALCANTI, NETO, M. T. O.; ROCHA DA ROCHA, A. M. **Noções de Prospeção e Pesquisa Mineral para Técnicos de Geologia e Mineração**. Editora IFRN-RN, 2010. 267 p.

CEMBER, H; JOHNSON, T. E. **Introduction to Health Physics**. 4 Ed. New York: Mc Graw Hill, 2009.

CHAU, N. D.; WYSZOMIRSKI, P.; CHRUSCIEL, E.; OCHOŃSKI, A. **Uranium in mining water of kaolin open pit in Zarów (Lower Silesia); methodology of determination and genetic remarks**. Appl Radiat Isot. 51(5):593-7, 1999.

CLT - CONSOLIDAÇÃO DAS LEIS DO TRABALHO. **Decreto de lei n.º 5.452**, 1º de maio de 1943.

CNEN- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. POSIÇÃO REGULATÓRIA 3.01. **Diretrizes básicas de proteção radiológica**, 2005.

CNEN- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. POSIÇÃO REGULATÓRIA 6.02 . **Licenciamento de instalações radiativas**, 1998.

CNEN- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. POSIÇÃO REGULATÓRIA 3.01 / 007 DRS. **Níveis de intervenção e de ação para exposição crônica**, 2005.

CNEN- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. POSIÇÃO REGULATÓRIA 4.01. **Requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações mineiro-industriais**, 2005.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS/PRODEEM – PROGRAMA PARA O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA NOS ESTADOS E MUNICÍPIO - 2005. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea**. Disponível em <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: 25 de maio de 2013.

DAMASCENA, K. F. R.; SANTOS JÚNIOR, J.A.; CHARFUELAN, J. M. J.; A, R. S.; SILVA, A. A.; SANTOS, J. M. N.; FERNÁNDEZ, Z. H.; NETO, J. A. M. **Influence of Paraíba uranium deposit in the evaluation of radioecological dosimetry from São Mamede-PB**. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015 São Paulo, SP, Brazil, 2015.

DLAMINI, S.G.; MATHUTHU, M.M.; TSHIVHASE, V.M. **Radionuclides and toxic elements transfer from the princess dump to water in Roodepoort, South Africa**. Journal of Environmental Radioactivity, v. 153, p. 201-205, 2016.

FAANU, A.; ADUKPO, O. K.; TETTEY-LARBI, L.; LAWLUVI, H.; KPEGLO, D. O.; DARKO, E. O.; EMI-REYNOLDS, G.; AWUDU, R. A. **Natural radioactivity levels in**

soils, rocks and water at a mining concession of Perseusgold mine and surrounding towns in Central Region of Ghana, *SpringerPlus*, v. 5, n. 98, 2016.

FOLKNER, W. M.; WILLIAMS, J. C. **Mass parameters and uncertainties in planetary ephemeris DE421**. Interoffice Memo. 343R-08-004 - internal document - Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 2008.

GERAB, ANDRÉ TABOSA FERNANDES DE SANTA CRUZ. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias**/ André Tabosa Fernandes de Santa Cruz Gerab. – 106 p. Natal, RN, 2014.

HENDRY, JH, SIMON SL, WOJCIK A, SOHRABI M, BURKART W, CARDIS E, LAURIER D, TIRMARCHE M, HAYATA I. **Human Exposure to High Natural Background Radiation: What Can It Teach Us about Radiation Risks?** *Journal of radiological protection : official journal of the Society for Radiological Protection*, v. 29, p. 29-42, 2009.

HESTERBERG, T.; MOORE, D. S.; MONAGHAN, S.; CLIPSON, A.; EPSTEIN, R. **Bootstrap methods and permutation tests**. In: *The practice of business statistics: using data for decisions*. New York: W.H. Freeman, 2003. cap. 18.

HOSODA, M.; TOKONAMI, S.; OMORI, Y.; SAHOO, S. K.; AKIBA, S.; SORIMACHI, A.; ISHIKAWA, T.; NAIR, R. R.; JAYALEKSHMI, P. A.; SEBASTIAN, P.; IWAOKA, K.; AKATA, N.; KUDO, H. **Estimation of external dose by car-borne survey in Kerala, India**. *PLoS One*. v. 17, 10(4):0124433. 2015.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data**. IAEA Publication, Technical Report: TECDOC 1363, ISSN 1011-4289, Viena, p. 179, 2003.

ICRP, 1990. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP. Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3), 1990.

ICRP, 2007. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP. Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4), 2007.

IBGE, **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 22 abr. 2015.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da econômica mineral brasileira** – 5. ed. Brasília: IRAM, 2011. 28 p. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001157.pdf>> Acesso em: 20 jun. 2014.

ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).

ICRP, 1990. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP. Publication 60. Ann. ICRP 21 (1–3), 1990.

IDEMA - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE. **Perfil do seu município**. Disponível em: <http://www.idema.rn.gov.br/perfil_o.asp>. Acesso em: 10 abril. 2015.

IPEA – INTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração**. Coordenação: Ministério do Meio Ambiente, 2012.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. 3 ed., New York: John Wiley & Sons, 2000.

LIRA, H. L. E NEVES, G. A. **Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 8 n. 3 p. 110 –117, 2013.

LITTLE, M. P.; WAKEFORD, R. E.; TAWN, J.; BOUFFLER, S. D.; DE GONZALEZ, A. B. **Risks Associated with Low Doses and Low Dose Rates of Ionizing Radiation: Why Linearity May Be (Almost) the Best We Can Do**. Radiology.v. 251, p. 6–12, 2009.

LMRI – LABORATÓRIO DE METROLOGIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES/ DEN, UFPE. **Certificação nº 6490/0911**. Recife, 2011.

MÁDUAR, F. M. **Determinação de Fatores de Conversão de Dose para Radiação GAMA Externa em Residências**. 2000. 64 p. Dissertação (Mestrado). IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo: 2000.

MAHER, O. EL-GHOSSAIN; RAED, M. ABU SALEH. **Radiation Measurements in Soil in the Middle of Gaza-Strip Using Different Type of Detectors**. The Islamic University Journal - Series of Natural Studies and Engineering, v.15, p. 23-37, 2007.

MANUAL GF INSTRUMENTS. **Gamma Surveyor**. User Guide v. 1.2. Czech Republic, 2013, 51p.

MARSH, JW; BLANCHARDON, E; GREGORATTO, D; HOFMANN, W; KARCHER, K; NOSSKE, D; TOMÁSEK L. **Dosimetric calculations for uranium miners for epidemiological studies**, Radiat Prot Dosimetry, v. 149, n. 4, p. 371-83, 2012.

MAZZILLI, B. P.; MÁDUAR, M. F.; CAMPOS, M. P. **Radioatividade no Meio Ambiente e Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental**. Documento TNA – 5754, IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011, 92 p.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, BRASIL. **Relatório Técnico 39 Perfil do Caulim**. Estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral. MME: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Banco Mundial, 2009.

MORAIS, E. N. L. **Dose de radiação ambiental em área habitada na região urano-fosfática de Pernambuco**. 2013. 41p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

NR 22 - **Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**, Portaria MTE n.º 2.037, de 15 de dezembro de 1999.

OLIVEIRA apud EISENBUD, M. **Environmental radioactivity: From Natural, Industrial, and Military Sources**, Academic Press, Orlando, 1987.

OLIVEIRA, M. A. de. **Prospecção, pesquisa e produção de urânio no Brasil: planejamento, busca e resultados**. 2011. 50p. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia apresentada ao Departamento de Estudos da Escola Superior de Guerra), Rio de Janeiro, 2011.

OLIVEIRA, S. F., CUNHA, A. L. C. MENDES V.A. **Contexto geológico e estrutural da formação seridó, nas pedreiras do “preto matriz”, município de currais novos/rn– Província Borborema**. Ambiente Mineral.Revista Brasileira de Mineração e Meio Ambiente, v. 3, n. 1, 2013.

OTERO, U. B.; ANTONIAZZI, B. N.; VEIGA, L. H. S.; TURCI, S. R.; MENDONÇA, G. A. E S. **Aplicação de uma metodologia de screening para avaliar a mortalidade por câncer em municípios selecionados do Estado de Minas Gerais, Brasil**, Cad. Saúde Pública, v.23 suppl.4, *On-line version*, Rio de Janeiro, 2007.

PANI, R.; BENNATI, P.; PELLEGRINI, R.; CINTI, M. N.; SCAFE, R.; STEFANO, R.; De VINCENTIS, G.; Di CASTRO, E.; Lo MEO, S.; FABBRI, A.; CENCELLI, V.; De NOTARISTEFANI, F. **LaBr3 (Ce) and NaI (Tl) performance comparison for single photon emission imaging**. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), p. 4433-4436, 2011.

PASCHOA, A. S.; STEINHÄUSLER, F. **Terrestrial, Atmospheric and Aquatic Natural Radioactivity**. Radioactivity in the Environment, v. 17, p. 29 -85, 2010.

PEREIRA, W. S.; JÚNIOR, D. A. CARMO, R. **Impacto Ambiental Radiológico Atmosférico Mina de Urânio de Caetité, BA**. II Workshop de Radioproteção na Indústria. V. 1, Recife, 2004.

PERLATTI, R. E., Ed. **Mineração no semiárido brasileiro**. Brasília, DF, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009.

RAFIQUE, M.; KEARFOT, T K. J.; AHMAD, K.; AKHTER, J.; KHAN, A, R.; SAEED, R. A.; RAHMAN, S. U.; MATIULLAH; RAJPUT, M. U. **Intercomparison of environmental gamma doses measured with a NaI (Tl) survey meter and thermoluminescent dosimeters (TLDs) in the Poonch division of Azad Kashmir, Pakistan**. Biomed Environ Sci. v. 27, n.12, p. 969-72, 2014.

ROCHA, E. A. **Avaliação da taxa de dose devido aos granitos ornamentais em ambientes públicos e privados na cidade do Recife-Pernambuco-Brasil**. 2012. 77p. Tese (Doutorado). UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

SAMPAIO, C. N. E. **Aproveitamento de feldspato pegmatítico da região Borborema-Seridó para produção de vitrocerâmica feldspática reforçada com leucita**. Série Rochas e Minerais Industriais -SRMI - 13. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2008.

SANTOS JÚNIOR J. A. **Migração de urânio e rádio-226 no solo em torno da ocorrência urinífera do município de Pedra - PE.** 2005. 89 p. Dissertação (Mestrado). UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SANTOS JÚNIOR, J. A. **Avaliação Radiométrica do U-238, Ra-226, Th-232 E K-40 em uma Área Anômala do Agreste de Pernambuco.** 2009. 142p. Tese (Doutorado). UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

SANTOS JÚNIOR, J. A.; CARDOSO, J. J. R. F.; SILVA, C. M.; SILVEIRA, S. V.; AMARAL, R. S. **Determination of radionuclides in the environment using gamma-spectrometry.** Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, v. 269, n. 2, p. 451-455, 2006.

SHAPIRO, S. S.; FRANCA, R. S. **An Approximate Analysis of Variance Test for Normality.** Journal of the American Statistical Association, v. 67, p. 215–216, 1972.

SILVA, A. A. **Dosimetria radioecológica na ocorrência uranífera de São José de Espinharas-PB.** 2014. 66p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 2014.

SILVA, DANIEL VITOR GOMES; ALEXANDRE MALCO JEIEL DE OLIVEIRA; NASCIMENTO, PAULO SÉRGIO DE REZENDE; PETTA, REINALDO ANTÔNIO. **Banco de dados geográficos no spring visando a análise geoambiental na região do Seridó.** Holos, Ano 24, v. 2, 2008.

STREFFER, C. **The ICPR 2007 recommendations.** Radiation Protection Dosimetry, vol. 127, n. 1-4, pp. 2-7, 2007.

TANAKA, KIMIO; ARIF, MANSYUR; KAMADA, NANA O. **The usefulness of two-colour fluorescence in situ hybridization technique using chromosomal subset atmetaphase and interphase stage in radiation biodosimetry.** Indian Journal of Science and Technology, v. 2, n.4, p. 1-11, 2009.

TODOROVIĆ, D.J.; JANKOVIĆ, M. M. **Natural radioactivity of materials used in industry and construction in Serbia.** J Environ Sci Health a Tox Hazard Subst Environ Eng. v. 46 n.10, p. 1147-53, 2011.

TUREKIAN, K. K. Abundances of Th and U in earth crust in McGraw-Hill. Encyclopedia of Science and Technology, v. 4, p. 627, 1970.

TZORTZIS, M.; TSERTOS, H.; CHRISTOFIDES, S.; CHRISTODOULIDES, G. **Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic rocks.** Radiation Measurements, v. 37, p. 221-229, 2003.

UJIĆ, P.; ČELIKOVIĆ, I.; KANDIĆ, .A; VUKANAC, I.; ĐURAŠEVIĆ, M.; DRAGOSAVAC, D.; ŽUNIĆ, Z. **Internal exposure from building materials exhaling ²²²Rn and ²²⁰Rn as compared to external exposure due to their natural radioactivity content.** Journal: Applied Radiation and Isotopes - Appl Radiat isotopes, v. 68, n. 1, p. 201-206, 2010.

UNSCEAR – UNITED SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATIONS – 1993. **Sources and effects of ionizing radiation**, New York, 1993.

UNSCEAR – UNITED SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATIONS – 2000. **Exposures from Natural Radiation Sources**. Annex B. New York, v. 1, 2000.

UNSCEAR – UNITED SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATIONS – Annex B, 2008. **Sources and effects of ionizing radiation**, New York, vol. 1, 2010.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - 2006. **Radiation Information**. Disponível em <<http://www.epa.gov/radiation/radionuclides>>. Acesso em: 20 de maio de 2014.

VEARRIER, D.; CURTIS, J. A.; GREENBERG, M. I. **Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials**. ClinToxicol, v.47, p. 393-406, 2009.

VEIGA, L. H. S., KOIFMAN, S. **Pattern of cancer mortality in some Brazilian HBRAs**. In: Proc. of 6th International Conference on High Levels of Natural Radiation and Radon Areas. Kinki University, Osaka, Japan. International Congress Series, v. 1276, p.110-113, 2005.

VEREMEYEVA, G.; AKUSHEVICH, I.; POCHUKHAILOVA, T.; BLINOVA, E.; VARFOLOMEYEVA, T.; PLOSHCHANSKAYA, O.; KHUDYAKOVA, O.; VOZILOVA, A.; KOZIONOVA, O.; AKLEYEV, A. Long-term cellular effects in humans chronically exposed to ionizing radiation. **Health Phys.**, v. 99, n. 3, p. 337-46, 2010.

VERÍSSIMO, C; SANTOS, R.V.; PARENTE, C.V.; NETO, J. A. N. **The Itataia phosphate-uranium deposit (Ceará, Brazil) new petrographic, geochemistry and isotope studies**. Earth Sciences and Resources Institute, Elsevier, USA. Journal of South American Earth Sciences, v. 70, May 2016.

VERMA, S. K.; OLIVEIRA, E.P. Tectonic setting of basic igneous and metaigneous rocks of **Borborema Province, Brazil using multi-dimensional geochemical discrimination diagrams**. Journal of South American Earth Sciences, v. 58, p. 309-317, 2015.

VIRUTHAGIRI, G.; RAJAMANNAN, B.; JAWAHAR, K. S. **Radioactivity and Associated Radiation Hazards in Ceramic Raw Materials and End Products**. Radiation Protection Dosimetry, vol. 157, n. 3, p. 383–391, 2013.

WAKEFORD, R. **Radiation in the workplace - a review of studies of the risks of occupational exposure to ionising radiation**. J Radiol Prot, v.29, p. 61-79, 2009.

YASIR, M. S.; MAJID, A. A.; YAHAYA, R. **Study of Natural Radionuclides and Its Radiation Hazard Index in Malaysia Building Material**. Radioanal Nucl Chem, v. 273, n. 3, p. 539-541, 2007.

APÊNDICE A – Recomendações

A fim de tratar da correlação da influência da jazida de São José de Espinharas-PB nos valores das taxas de doses efetivas identificadas nos campos de mineração deste estudo, se faz necessária a caracterização dos radionuclídeos presentes nas diferentes rochas e minerais envolvidos em ambas as áreas.

Por outro lado, os rejeitos de caulim dispersos aleatoriamente no meio ambiente na mina D, em Salgadinho-PB, devem ser avaliados quanto a possível concentração anômala de radionuclídeos primordiais, a fim de identificar se o valor da taxa de dose 2,94 mSv/a, refere-se ao mineral principal explorado, ou a rocha encaixante do mesmo.

Por fim, se fazem necessários estudos epidemiológicos de caso-controle, coorte e correlação geográfica que tratem dos padrões, causas e quantificação dos valores obtidos na dosimetria ambiental deste estudo.